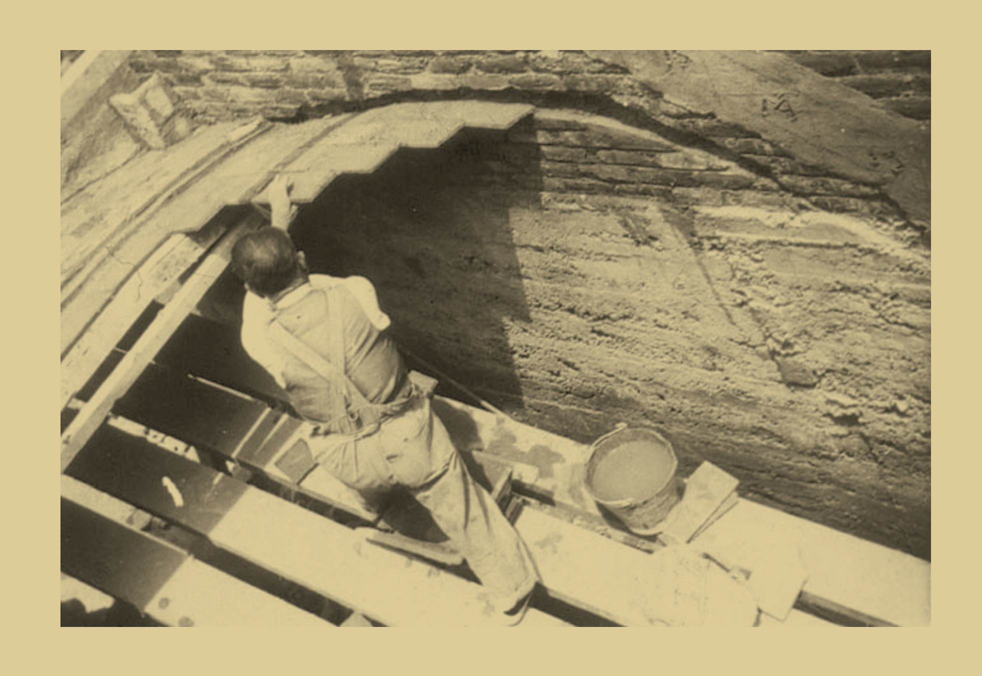
BÓVEDAS SIN CIMBRA: LA CONSTRUCCIÓN TABICADA

MEMORIA ACADÉMICA DEL TALLER EXPERIMENTAL DE HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN DEL CURSO 2013/2014

por

Paula Fuentes González
Ignacio Javier Gil Crespo
Santiago Huerta
Carlos Martín Jiménez
Esther Redondo Martínez



CUADERNOS DEL INSTITUTO JUAN DE HERRERA DE LA *ESCUELA DE ARQUITECTURA DE MADRID*

9-91-01

BÓVEDAS SIN CIMBRA: LA CONSTRUCCIÓN TABICADA

MEMORIA ACADÉMICA DEL TALLER EXPERIMENTAL DE HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN DEL CURSO 2013/2014

por

PAULA FUENTES GONZÁLEZ
IGNACIO JAVIER GIL CRESPO
SANTIAGO HUERTA
CARLOS MARTÍN JIMÉNEZ
ESTHER REDONDO MARTÍNEZ

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

9-91-01

C U A D E R N O S
D E L   I N S T I T U T O
J U A N   D E   H E R R E R A

NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
09 Ordinal de cuaderno (del autor)

TEMAS

1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN
9 HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN
0 VARIOS

Bóvedas sin cimbra: la construcción tabicada.
Memoria académica del taller experimental de historia de la construcción del curso 2013/2014.

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Gestión y portada: Almudena Gil Sancho.
CUADERNO 438.01 / 9-91-01
ISBN-13: 978-84-9728-513-1
Depósito Legal: M-21409-2014

Bóvedas sin cimbra: la construcción tabicada

Memoria académica del taller experimental
de historia de la construcción del curso 2013/2014

Paula Fuentes González
Ignacio Javier Gil Crespo
Santiago Huerta
Carlos Martín Jiménez
Esther Redondo Martínez

Índice

PRESENTACIÓN

Cuando oigo, imagino; cuando veo, comprendo;
cuando hago, recuerdo para siempre.
Proverbio chino

Las bóvedas tabicadas, construidas sin cimbra con ladrillos puestos de plano, son un tipo de bóveda muy frecuente en España. Las primeras están fechadas en el siglo XIV, pero probablemente tienen un origen islámico. Desde el s. XVI se emplean en casi toda España. Son un tipo mediterráneo: se encuentran también en Italia (volte a foglio o a la volterrana), Francia (voûtes plates) y Argelia (rhorfas). Sólo desde este ámbito puede entenderse su origen y difusión, si bien hasta ahora los estudios han sido locales.

En la segunda mitad del s. XIX se aplicaron en la arquitectura industrial; el arquitecto valenciano Guastavino las llevó a América en 1880, donde construyó centenares en los edificios más importantes de esa época (su hijo las siguió construyendo hasta los años 1940.) Por su gran economía, tras la Guerra de 1936, se emplearon con frecuencia en la reconstrucción de una España devastada, tanto en restauración como en obra nueva. Su empleo fue común hasta finales de los años 1950. Después su uso se fue restringiendo, hasta casi desparecer (en la construcción de escaleras se siguieron usando hasta los años 1980).

En los dos últimos decenios ha habido un "renacimiento" de las bóvedas tabicadas. Algunos arquitectos e ingenieros han vuelto a emplearlas por su facilidad de ejecución y su valor estético: en España, Fortea y López Bernal, y en América, Ochsendorf y Ramage, entre otros. Algunos constructores han recuperado esta técnica y la aplican con notable éxito (Carlos Martín). Se han realizado también numerosos talleres de formación para jóvenes albañiles.

La recuperación de la técnica tabicada tiene tanto un interés histórico (Historia de la Construcción), como práctico (Restauración y obra nueva). Las bóvedas de fábrica han estado excluidas durante muchos años del vocabulario arquitectónico (hay notables excepciones: Ramírez Ponce, México). Sin embargo, la limitación que impone el material, que no resiste tracciones, puede usarse con ventaja en el proyecto. La disciplina del equilibrio a compresión (corolario fundamental de la moderna teoría de Heyman), limita las formas, pero no ha impedido a lo largo de toda la historia la expresión arquitectónica. Por el contrario, los auténticos maestros supieron usar esa "limitación" en provecho de su obra (Panteón, Santa Sofía, catedrales góticas). La libertad no consiste en la ausencia de reglas.

La ignorancia es peligrosa en todos los ámbitos de la vida; también en la arquitectura. Las bóvedas tabicadas han sido consideradas "imposibles de calcular"; como resultado, muchas han sido demolidas y otras sufren refuerzos innecesarios, cuando no dañinos. El respeto va asociado al conocimiento: resulta más difícil destruir o desvirtuar aquello que comprendemos.

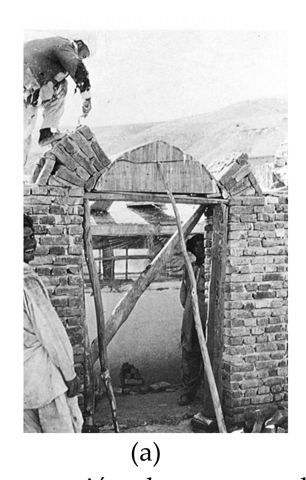
* * *

El objetivo del Taller Experimental de Bóvedas Tabicadas (dentro de la Línea de Historia de la Construcción) es introducir a futuros arquitectos en el mundo de la construcción tabicada. Porque es un "mundo", amplio, rico y complejo. El Taller ha sido posible gracias al trabajo entusiasta de un grupo de jóvenes profesores, Paula Fuentes (UPM), Ignacio Gil-Crespo (UAX) y Esther Redondo (UEM), y a la ayuda generosa de un Maestro albañil, Carlos Martín, que nos ha regalado su tiempo y su conocimiento. Finalmente, los alumnos del Taller se han comprometido con la iniciativa y han puesto "manos a la obra", amasando yeso, asentando ladrillos, sacando fotos, participando en los seminarios. A todos ellos, mi agradecimiento.

Santiago Huerta. Madrid, julio de 2014

1. HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN SIN CIMBRA Y TABICADA

La construcción adovelada necesita el apoyo de una cimbra, generalmente de madera, durante la colocación de las piezas hasta que la bóveda se completa y comienza su funcionamiento estructural. Sin embargo, con el fin de reducir el uso de cimbras en aras de una mayor eficiencia económica de la obra, desde épocas tempranas de la historia de la arquitectura se han desarrollado unos sistemas constructivos que reducen considerablemente su uso. La tradición constructiva ha permitido conocer algunas de estas técnicas que aún siguen en uso en las regiones de Oriente Próximo y Medio.



(a)



(b)

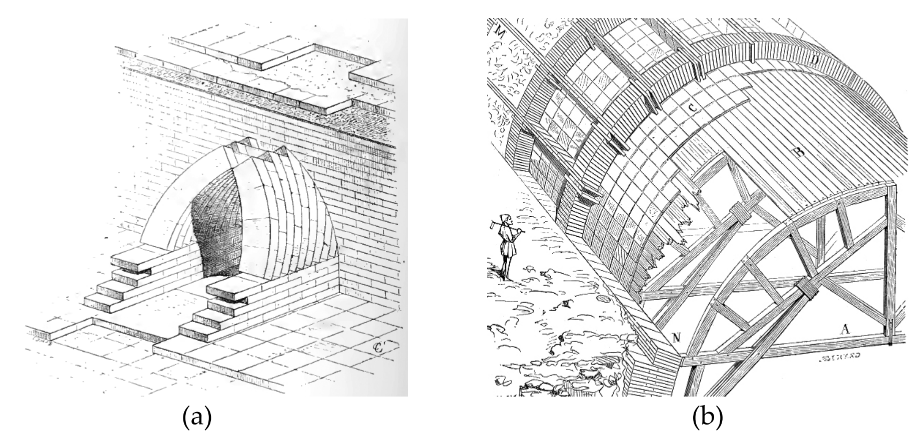
Figura 1. (a) Construcción de un arco de ladrillo apoyado en una cimbra de madera en Afganistán (Besenval 1984, *Technologie de la Voûte dans l'Orient Ancien*, pl. 14b). (b) Construcción de bóvedas sin cimbra en Irán (Besenval 1984, pl. 45b)

La construcción sin cimbra consiste en la colocación de pequeñas piezas de ladrillo unidas con mortero —principalmente de yeso, al menos las primeras capas— para construir una bóveda, de manera que el mortero colabora en la sustentación temporal por adherencia de las piezas en los arcos laterales o muros testeros hasta que se va formando la bóveda. La construcción sin cimbra, a diferencia de la construcción adovelada, sólo utiliza como medios auxiliares una plataforma desde la que trabaja el operario y unas formas, cerchas, camones o cintreles para el control geométrico, reduciendo así de manera considerable el empleo de la madera en los medios auxiliares de construcción. La bóveda de rosca de ladrillo basa su estabilidad provisional en la inclinación de las piezas de ladrillo mientras fragua el mortero. Por su parte, la bóveda tabicada se forma mediante la colocación de las rasillas de plano y en varias capas —por lo general dos o tres— de manera que el espesor se reduce considerablemente hasta los ocho o diez centímetros. La construcción de bóvedas tabicadas se basa, por lo tanto, en los materiales —rasillas y yeso— y su colocación: de plano y por capas.

El desarrollo técnico que supone la construcción tabicada respecto de la adovelada colaboró en la propagación de la técnica. Sin embargo, la búsqueda del origen ha sido objeto de debate y discusión.

Origen de la construcción tabicada: las bóvedas sin cimbra

Una técnica constructiva es el fruto de un desarrollo generacional. A pesar de que se ha tratado, por influencia de Choisy, de buscar un origen conceptual a la bóveda tabicada en el empleo de ladrillos puestos de plano como encofrado perdido y armadura en la construcción de bóvedas de hormigón, sin embargo, ésta no es una construcción tabicada ya que esos ladrillos no funcionan como una bóveda: se apoyan en rastreles y cimbras para formar un encofrado que quedará embebido en el hormigón.

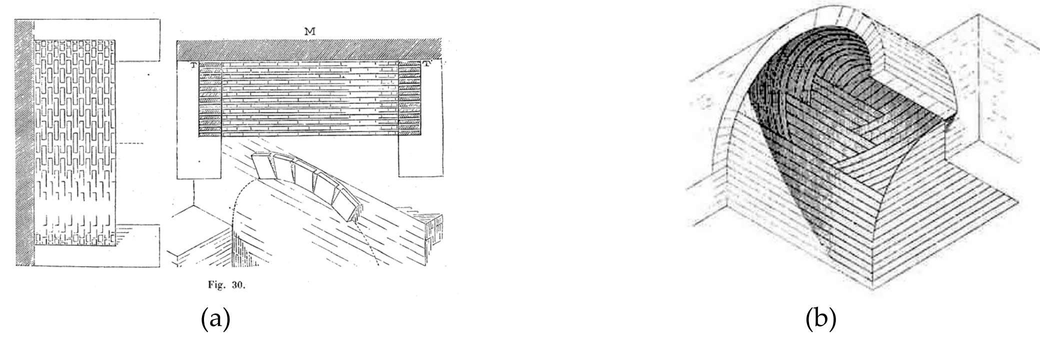


(a) (b)

Figura 2. (a) Bóveda apuntada de un canal en Khorsabad (Perrot y Chipiez, *Histoire de l'Art dans l'antiquité. L'Ègipt,* 1884, fig. 92). (b) Detalle de la construcción de una bóveda de cañón romana según Viollet-le-Duc (*Dictionnaire raisonné…* 1854-1868, 9: 469, «voûte», fig. 1). Se aprecia el empleo de ladrillos colocados de plano

La construcción tabicada tiene su razón en el empleo de dos materiales —ladrillo y yeso— y en la evitación de uso de cimbras. En este sentido, su origen ha de buscarse en la tradición constructiva que data desde el cuarto milenio antes de nuestra era en Oriente Próximo, donde la carestía de madera obliga a aguzar el sentido práctico de la construcción para impedir su derroche como medio auxiliar. Las arquitecturas parta y sasánida desarrollaron, entre los siglos I a.C. y VI d.C., una técnica de construcción de bóvedas sin cimbra consistente en apoyar roscas de ladrillo colocados «a bofetón», esto es: el ladrillo se coloca de canto y con una ligera inclinación de manera que la adherencia del mortero lo mantiene descansado con la rosca anterior. La primera rosca se apoya sobre un muro testero, si bien hay casos de construcción de este tipo de bóvedas que arrancan formando falsas pechinas que van definiendo una bóveda. Las roscas siguen un perfil sensiblemente parabólico. El empleo del mortero de yeso, de más rápido fraguado, derivó en que las roscas pudiesen colocarse verticalmente en lugar de inclinadas.

La técnica evoluciona de manos de los constructores bizantinos y es adoptada por la cultura islámica como un medio económico de construir bóvedas ahorrando en medios auxiliares de madera. Son éstos los que difunden la antigua tradición de bóvedas de ladrillos a bofetón o a rosca por el ámbito mediterráneo.



(a) (b)

Figura 3.Construcción bizantina sin cimbra según Choisy. (a). Construcción de una bóveda de cañón por hojas (Choisy, *L'art de bâtir chez les Byzantins,* 1883, fig. 30). (b). Capilla aneja a la iglesia de San Panteleemón en Salónica (Choisy 1883, lám. 6, fig. 3)

La bóveda tabicada en el ámbito mediterráneo medieval

La técnica tabicada de construcción de bóvedas con piezas pequeñas de ladrillo colocado de plano y tomado con mortero de yeso —al menos la primera capa— tiene su desarrollo en el ámbito Mediterráneo medieval a través de la tradición popular. En todo el arco del Mediterráneo occidental —Sicilia, Cerdeña, Rosellón, Cataluña, Levante, Túnez...— se difundió la construcción de bóvedas tabicadas desde la Edad Media cuando esta técnica constructiva tradicional y popular pasa a ser empleada en la arquitectura oficial. Se conservan algunos antecedentes de bóvedas tabicadas en la construcción almohade como las bóvedas de escaleras en Siyasa (Cieza) o Xátiva, las bóvedas caladas entre nervios tabicados de Tremecén o la plementería de la bóveda del castillo de Villena. El desarrollo de la arquitectura de ladrillo y yeso de la construcción hispanomusulmana junto al hecho de que las regiones en donde se han construido tradicionalmente las bóvedas tabicadas —la parte oriental de la península Ibérica— se perfilan como los factores que apuntan como plausible la hipótesis de un posible origen hispanomusulmán de esta técnica de construcción abovedada.



Figura 4. Bóveda sin nervios del monasterio de la Trinidad de Valencia de ca.1460

Hacia el último tercio del siglo XIV, la bóveda tabicada ya se emplea sistemática y generalizadamente en la construcción de los plementos de bóvedas de crucería de piedra o de yeso de las iglesias y conventos que se erigieron en el área levantina. De esta época se conservan documentos en los que ya se contrata la construcción de bóvedas tabicadas y se pone de manifiesto su conveniencia, ligereza y economía con el fin de aprender, popularizar y divulgar la técnica.

El desarrollo de la construcción tabicada moderna y la tratadística

Desde el foco medieval levantino, la construcción de bóvedas tabicadas se generaliza por toda España a partir del siglo XVI y, en parte, gracias a la labor tratadística de Fray Lorenzo de San Nicolás. En el *Arte y Uso de la Arquitectura* (1539-1665) menciona las bóvedas tabicadas desde los puntos de vista constructivo —materiales, descripción de la técnica y sus aplicaciones— y estructural. Fray Lorenzo expresa la ventaja de la construcción tabicada respecto de la cantería en el ahorro, no sólo de cimbras, sino del grosor de los estribos y muros que sostienen las bóvedas: el espesor del muro que sostiene una bóveda de piedra es de un tercio de la luz de ésta (L/3); sin embargo, el muro sobre el que se levanta una bóveda tabicada sólo ha de tener un quinto de la luz (L/5).



(a) (b)

Figura 5. (a) Sección de una iglesia según Fray Lorenzo de San Nicolás (1639, 112r). (b) Arranque de una bóveda tabicada de la reforma barroca de la iglesia de Peñalcázar (Soria)

La bóveda tabicada, que en su origen medieval se aplicó como plementería de las bóvedas de crucería, desarrolla nuevas formas adaptadas al nuevo lenguaje clásico y barroco de la arquitectura: se levantan bóvedas de cañón con lunetos, vaídas, esquifadas, de superficie de traslación, cúpulas semiesféricas... Una vez más, la versatilidad y eficiencia económica —en lo relativo al material, las herramientas, al ahorro de cimbras y medios auxiliares y al grado de especialización de los operarios frente a la cantería— influyen en la elección de esta técnica constructiva.

El trabajo de albañilería no se limita a la cáscara de la bóveda: en el trasdós de las bóvedas modernas se tienden tabiques, lengüetas o costillas que forman un relleno ligero para la

formación de suelos y cubiertas sobre las bóvedas a la vez que refuerzan el comportamiento estructural. La construcción oculta entre las bóvedas y la cubierta alcanza hitos notables como la iglesia de San Jaime en Villarreal. En un informe ante la Academia del arquitecto de esta iglesia se señala que «en ese país se quitan las aguas sin madera», manifestando la capacidad de la construcción tabicada de adaptarse a cualquier función constructiva.

La arquitectura del barroco y, sobre todo, de la Academia intensificó la construcción de bóvedas tabicadas en la labor de ennoblecimiento de los espacios interiores de las iglesias góticas: bajo las bóvedas de crucería y ocultando a éstas, se construyeron bóvedas tabicadas de cañón que se adaptaban mejor a las formas de la arquitectura clásica. Estas bóvedas se revestían con yeso formando trazados y motivos clásicos.

La tratadística del siglo XVIII recoge las ventajas de la construcción tabicada. En 1754 el Conde de Espie publica su tratado *Maniçère de render toutes sortes d'édifices incombustibles* en el que defiende la teoría monolítica de las bóvedas arguyendo que no producen empujes. En la traducción española de 1776 se incluye una censura previa de Ventura Rodríguez en la que se advierte de lo falso de estos asertos: «siempre que se trate de hacer alguno todo de Bobedas, y por consiguiente incombustible, es necesario dar abundante grueso à las paredes en los parages en que se necesite».

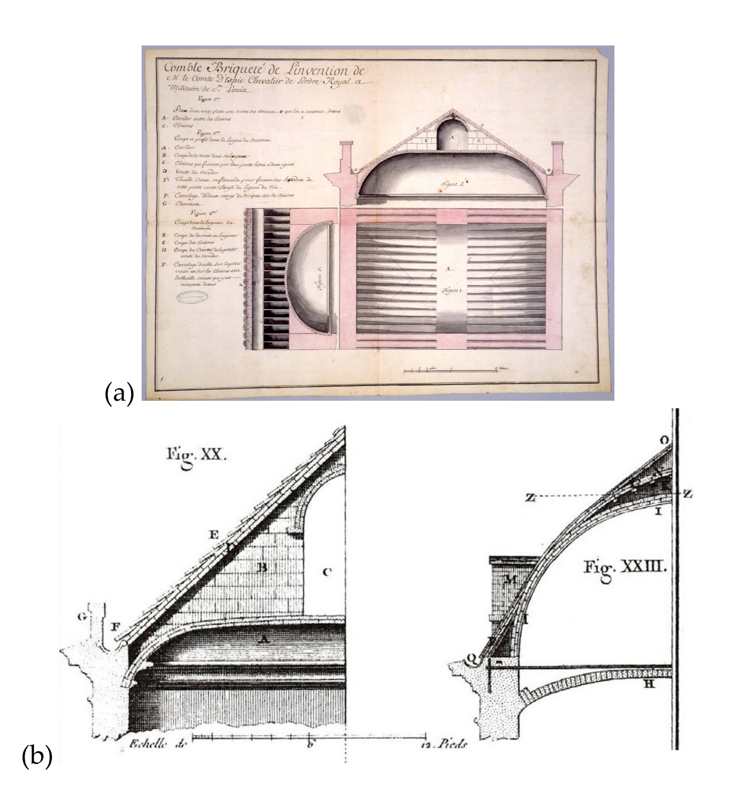
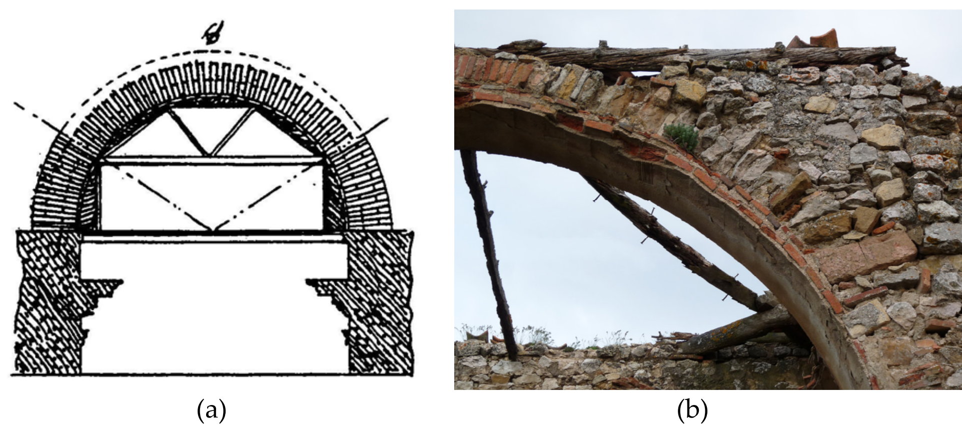


Figura 6. (a) Secciones y planta del trasdós de una bóveda tabicada de flecha L/4 donde se representan las lenguetas que refuerzan la bóveda a la par que forman la pendiente de la cubierta (Espie 1754, lám. 1). (b) Construcción de bóvedas tabicadas y tejados incombustibles. La cubierta de Espie redibujada y cubierta y bóveda con tirante del Palais Bourbon (Blondel y Patté 1771-1777, pl. 104, figs. 20 y 23)

La bóveda tabicada goza de un momento de esplendor en Francia gracias a la difusión en los tratados de Espie (1754), Laugier (*Essai sur l'architecture,* 1755) Patté y Blondel (*Cours d'Architecture,* 1771-1777), entre otros. En estos tratados se difunde la bondad de este tipo de construcción en relación a la incombustibilidad de los edificios que con ella se han levantado. Este interés por la bóveda tabicada en Francia retorna a España a través de las traducciones de estos tratados y los nuevos que se escriben influidos por éstos en lo que se refiere a la falsa ausencia de empujes (Benavente 1763, Sotomayor 1776, Bails 1796).

Ya en el siglo XIX destacan los tratados de Fornés y Gurrea (*Observaciones sobre la práctica del arte de edificar* ,1841 y 1846) y el de Ger y Lóbez (*Construcción Civil,* 1898). Fornés y Gurrea recoge la tradición constructiva de la bóveda tabicada en España recomendando utilizarla para cualquier tipo de edificio, detallando las bóvedas de escaleras y considerando su empleo como cimbra de las bóvedas o arcos de rosca. Ger y Lóbez está muy influido por el tratado de Fornés y Gurrea, si bien introduce novedades como los comentarios sobre su uso como plementería de bóvedas de crucería.



(a) (b)

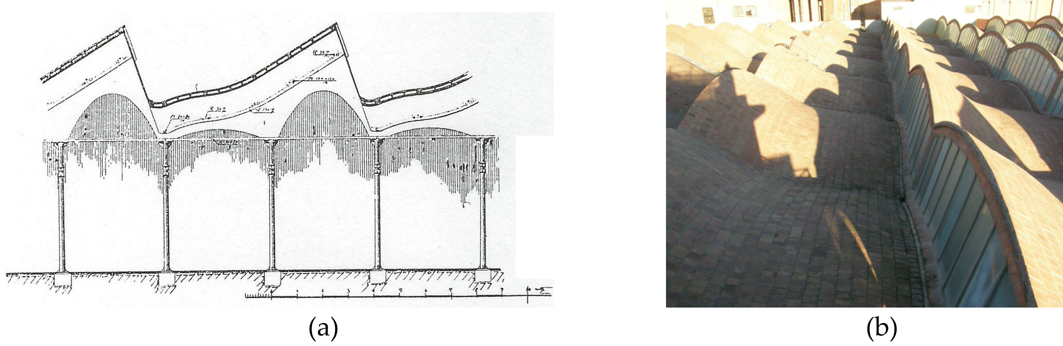
Figura 7. (a) Construcción de un arco toral mediante el empleo de una cimbra formada por un arco tabicado (Fornés y Gurrea 1841, lám. 6, fig. 8). (b) Arco toral de la iglesia de Peñalcázar (Soria) donde se ha utilizado esta técnica constructiva

La construcción tabicada en la Cataluña industrial y modernista

La pujante industria textil catalana posibilitó la construcción de fábricas en las que las necesidades de diafanidad, iluminación, rapidez y economía de construcción fueron respondidas por la construcción tabicada. La bóveda tabicada se empleó en la construcción de las fábricas catalanas de finales del siglo XIX y principios del XX con ejemplos tan notables como la fábrica Aymerich, Amat i Jover en Terrassa, de Lluís Muncunill.

La construcción tabicada tuvo una etapa de esplendor memorable con el movimiento modernista de la arquitectura en Cataluña. Los principales arquitectos del momento —Gaudí, Doménech i Montaner, Puig i Cadafalch, Jujol, Muncunill...— se aprovecharon de la versatilidad, facilidad de aplicación, ventajas económicas y maestría de los albañiles de la construcción tabicada. Estas ventajas colaboraron en que la construcción tabicada pudiese dar forma a la imaginación y la fantasía de formas propia de este movimiento: la búsqueda de

espectacularidad, movimiento, ligereza o pesadez, remembranza de formas neomedievalistas encontró su expresión material en la bóveda tabicada. Frente al carácter práctico y económico de la arquitectura industrial, la bóveda tabicada del modernismo adquiere una gran riqueza formal y estética.



(a) (b)

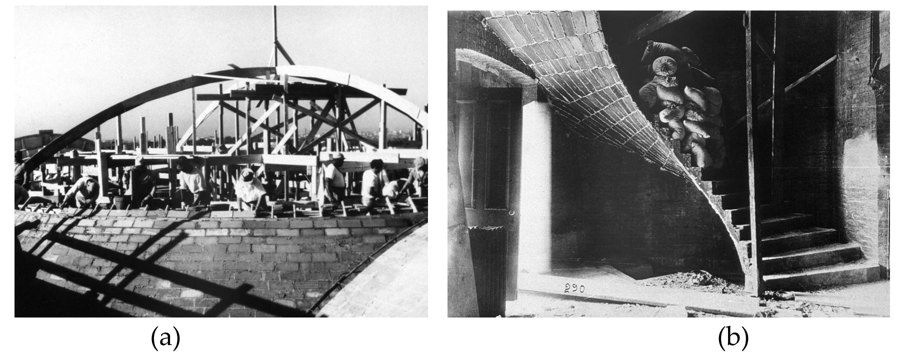
Figura 8. Bóvedas de la fábrica Aymerich, Amat i Jover en Terrassa. (a) Sección según Martorell (1910, 134, fig. 14). (b) Imagen de la cubierta

Los Guastavino y la bóveda tabicada en América

Formado en la Barcelona del modernismo y las fábricas, el arquitecto Rafael Guastavino Moreno emigró a Estados Unidos en 1881. Una vez asentado constituyó una empresa, la *Guastavino & Cia. Fireproof Construction Company,* que, continuada por su hijo Rafael Guastavino Expósito, se dedicó hasta 1962 en que se disuelve a asesorar a los arquitectos en la construcción de bóvedas tabicadas.

Los Guastavino se encargaban del proyecto de ejecución, el suministro de materiales, la provisión de un cuerpo técnico con ensayos y fórmulas de cálculo estructural y el desarrollo de la obra. El éxito del «Guastavino System» fue espectacular: se construyeron más de mil edificios con esta técnica tradicional reconvertida en industrial.

Una vez más, la construcción tabicada mostró su capacidad de adaptación a todas las formas arquitectónicas. El desarrollo que los Guastavino imprimieron a esta técnica concierne no sólo a los aspectos constructivos y de organización de la obra, sino que investigaron sobre las propiedades acústicas de los ladrillos, las características cromáticas y estéticas y el comportamiento mecánico.



(a) (b)

Figura 9. (a) Construcción de la cúpula de la National Shrine of Inmmaculate Conception, Washington. (b) Ensayo de carga de una escalera tabicada helicoidal

La bóveda tabicada en la arquitectura moderna

La irrupción de la primera arquitectura moderna racionalista en España fue, en una primera etapa, más estética que constructiva ya que la tradición constructiva estaba muy arraigada. Es habitual que los edificios levantados hasta los años 1930 presenten fachadas de influencia racionalista mientras que las escaleras y algunos pisos se construyen con bóvedas tabicadas.

A pesar del abandono de las formas abovedadas en favor de las adinteladas promulgadas por el cubismo purista y racionalista de la primera arquitectura moderna, los buenos arquitectos no fueron ajenos a esta técnica. Le Corbusier, entre otros maestros, supo ver en la técnica tabicada una construcción puramente racional. El maestro suizo estuvo en contacto con José Luis Sert, quien había empleado junto a Torres Clavé la bóveda tabicada en las viviendas para turistas de Garraf (1935). A través de la colaboración con Antonio Bonet Castellana la aplicó en el proyecto de la casa Jaoul si bien aquí no funciona como bóveda sino como encofrado perdido. Antonio Bonet emigró a Uruguay, donde siguió construyendo con bóvedas tabicadas consecuentemente a los principios teóricos que junto a los arquitectos del Grupo Austral habían lanzado en el manifiesto «Voluntad y acción» por el que promulgaban la inspiración artística en el surrealismo, el funcionalismo arquitectónico y el respeto por la naturaleza, las leyes físicas y la tradición vernácula.

La mecánica, la economía y la estética de las bóvedas tabicadas han inspirado nuevas técnicas constructivas y tipos estructurales como son la cerámica armada de Eladio Dieste o las cáscaras de hormigón de Félix Candela y Eduardo Torroja.

Hacia 1940 surgió un renacimiento de la construcción tabicada en España por mor de su eficiencia económica, estructural y tradición en la reconstrucción de las poblaciones que fueron arrasadas durante la Guerra Civil. La carestía de hierro en la España política aislada provocó a los arquitectos como Francisco de Asís Cabrero a buscar soluciones constructivas basadas en la tradición de la bóveda tabicada. Uno de los arquitectos más relevantes en la defensa y uso de la construcción tabicada fue Luis Moya. El autor del tratado *Bóvedas tabicadas* (1947) construyó un soberbio repertorio de bóvedas en el Museo de América (1942) y levantó complejas y virtuosas estructuras como la bóveda de la Iglesia de San Agustín de Madrid (1949-1954).

De manos de los albañiles contratados por Ricardo Porro, Vitorio Garatti y Roberto Gottardi para la construcción de las Escuelas de Arte de La Habana, la técnica tabicada llega a Cuba en 1961. Este orgánico conjunto de edificios constituyen una combinación de bóvedas, cúpulas y cáscaras de bóvedas tabicadas. Algunas de ellas, las de mayor luz como la del pabellón de baile, se reforzaron con nervios de hormigón armado.

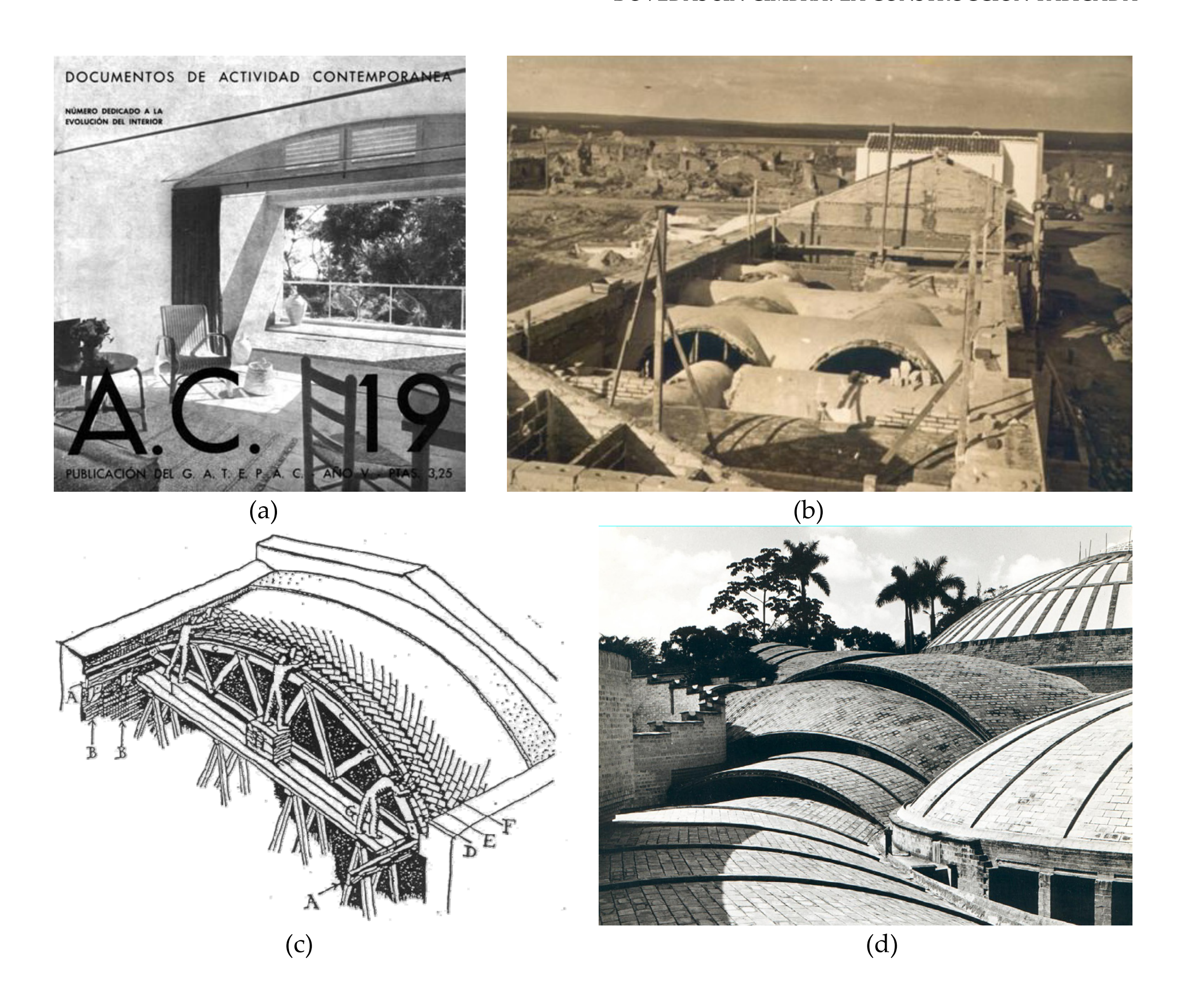


Figura 10. (a) Sert y Torres Clavé, interior de una vivienda para turistas en Garraf (1935) en la portada del número 19 de la revista *AC*. (b) Bóvedas tabicadas en viviendas de Villanueva de La Cañada, obra de la Dirección General de Regiones Devastadas (c) Luis Moya, construcción de una bóveda tabicada de cañon (1947). (d) Escuelas Nacionales de La Habana, de Porro, Garatti y Gottardi (1961)

La construcción tabicada ha mostrado una gran versatilidad para adaptarse a todos los lenguajes de la arquitectura partiendo de una arraigada tradición que hunde sus raíces en la historia de la construcción sin cimbra. Al presente, las miradas de los arquitectos, historiadores y docentes se vuelven de nuevo hacia esta técnica constructiva, pues de continuo surgen nuevos estudios y hallazgos que obligan a revisar y renovar el debate sobre su origen y evolución. Paralelamente, la construcción tabicada nunca ha dejado de practicarse y en la actualidad sigue escribiendo páginas de su historia de la construcción particular a través de los proyectos y realizaciones que en el ámbito de la universidad, en la actividad de la restauración y rehabilitación de monumentos o en el compromiso de la cooperación siguen aprovechando las magníficas cualidades mecánicas, económicas, sociales y estéticas de la bóveda tabicada.

2. ESTABILIDAD DE ARCOS Y BÓVEDAS

La teoría que rige el comportamiento estructural de las bóvedas tabicadas es la misma que la de cualquier edificio de fábrica. Esta teoría, el Análisis Límite de Estructuras de Fábrica, ha sido desarrollada principalmente por el profesor Jacques Heyman desde los años 60.

El material: la fábrica

Un edificio de fábrica está construido mediante piedras o ladrillos con o sin mortero, formando una estructura estable. La fábrica es un material muy diferente a los materiales modernos, ya que no es homogéneo ni isótropo, y que no tiene un comportamiento elástico, por tanto no podemos trabajar con las mismas hipótesis que utilizamos en el caso de las estructuras modernas.

Al analizar las propiedades mecánicas de la fábrica, podemos comprobar como la resistencia mecánica no es importante, sin embargo se pueden establecer tres hipótesis básicas, recogidas en los principios del análisis límite de estructuras de fábrica:

-la resistencia a compresión es infinita

-la resistencia a tracción es nula

-el fallo por deslizamiento es imposible

La primera hipótesis va en contra de la seguridad, sin embargo, si estudiamos las tensiones a las que trabajan los edificios de fábrica construidos que llevan varios siglos en pie, podemos concluir que la resistencia a compresión de las fábricas no es un parámetro relevante, ya que las tensiones de trabajo son muy bajas, y muy inferiores a su resistencia. En cuanto a la segunda hipótesis, es evidente que una piedra tiene una cierta resistencia a tracción, sin embargo, cuando se trata de un conjunto de piedras, no existe esta resistencia. Se podría considerar la resistencia del mortero a tracción, pero en general es un valor muy pequeño. Por último, el coeficiente de rozamiento de la piedra suele ser bastante elevado (alrededor de los 30º), esto, junto con una construcción adecuada, hace que la compresión genere el peso necesario para que el deslizamiento no se produzca.

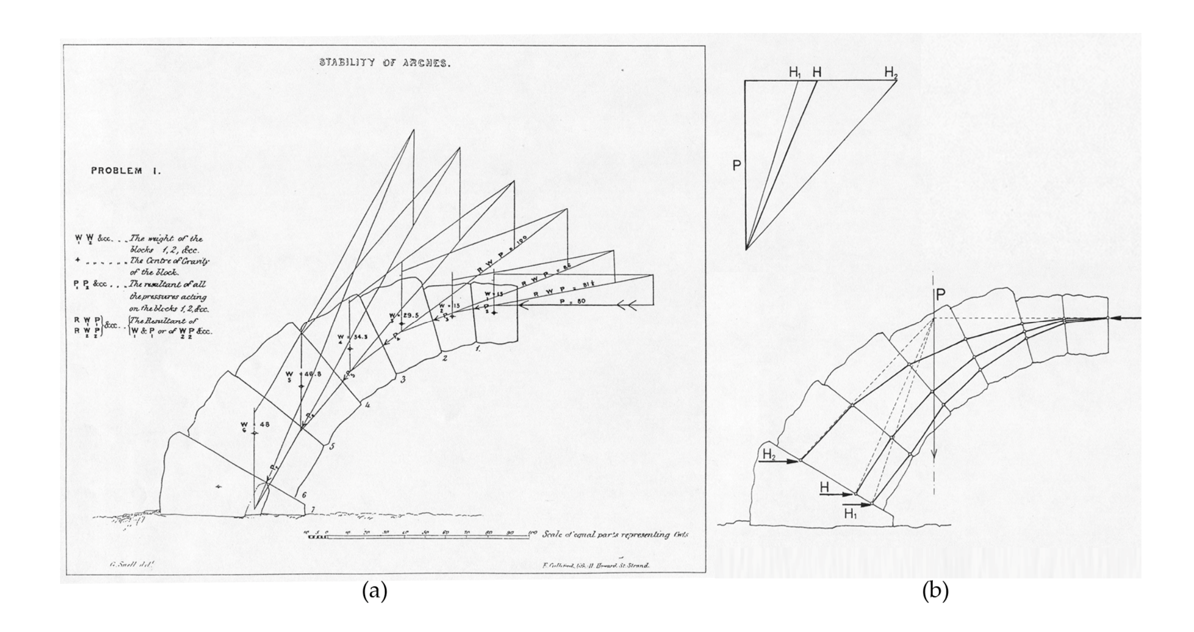
Estas hipótesis nos llevan a una conclusión fundamental sobre el comportamiento de las estructuras de fábrica: si las fábricas no resisten tracciones, entonces los esfuerzos o resultantes de tensiones tienen que estar contenidas dentro de la propia fábrica.

La línea de empujes

Para comprender y analizar las fábricas resulta muy útil el concepto de línea de empujes. La línea de empujes representa las ecuaciones de equilibrio, y es el lugar geométrico del punto de paso de los esfuerzos por un sistema de planos de corte dado.

Arcos: la indeterminación de la línea de empujes

Los arcos son estructuras hiperestáticas, esto quiere decir que tenemos infinitos conjuntos de esfuerzos internos en equilibrio con las cargas. Por tanto, para definir la línea de empujes necesitamos definir una serie de condiciones. Veamos el caso de medio arco simétrico, sometido a su propio peso (figura 11a). Para que se sujete tiene que haber un empuje en la clave, que lo suministraría el otro medio arco. Al componer el empuje con el peso de la primera dovela se obtiene una resultante, que corta a la junta en este punto. Esta resultante se compone con el siguiente peso, y así sucesivamente. La línea de empujes es la que resulta de unir los puntos de intersección de las resultantes con las juntas de las dovelas. Podemos observar cómo si aumentamos el empuje en la clave, obtendremos otra línea de empujes más tendida, y si lo disminuimos, otra más peraltada (figura 11b). En definitiva, para definir la línea de empujes de un arco es necesario definir tres condiciones. En este caso, la condición de simetría impone la condición de que el empuje en la clave debe ser horizontal. Otra condición sería el punto de aplicación del empuje, que puede moverse en todo el espesor de la junta. Por último, la magnitud de la componente horizontal. Aunque las condiciones de equilibrio no nos permiten fijar la línea de empujes, sí que podemos acotarla. Si peraltamos la línea de empujes lo máximo posible, obtendremos el empuje mínimo, mientras que si la estiramos, obtendremos el empuje máximo.



(a) (b)

Figura 11. (a) Equilibrio de un arco simétrico (Snell 1846); (b) Posibles líneas de empujes en un arco simétrico (Huerta 2004)

La analogía de la cadena de Hooke

El comportamiento de los arcos puede asimilarse al de una cadena invertida.[1] Robert Hooke lo explicó en 1670-80: "Del mismo modo que cuelga el hilo flexible, así, pero invertido, se sostiene el arco rígido". Si invertidos el hilo, lo que antes era tracciones pasarán a ser compresiones, pero las ecuaciones de equilibrio no varían.

Las fuerzas que tendían a juntar los extremos del hilo, tenderán a separar los apoyos del arco. La forma que toma el hilo bajo su propio peso recibe el nombre de catenaria. Según Hooke, si invertimos la catenaria, obtendremos la forma del arco perfecto. El mínimo descuelgue de la catenaria dará el empuje máximo, y el máximo descuelgue dará el empuje mínimo (figura 12).

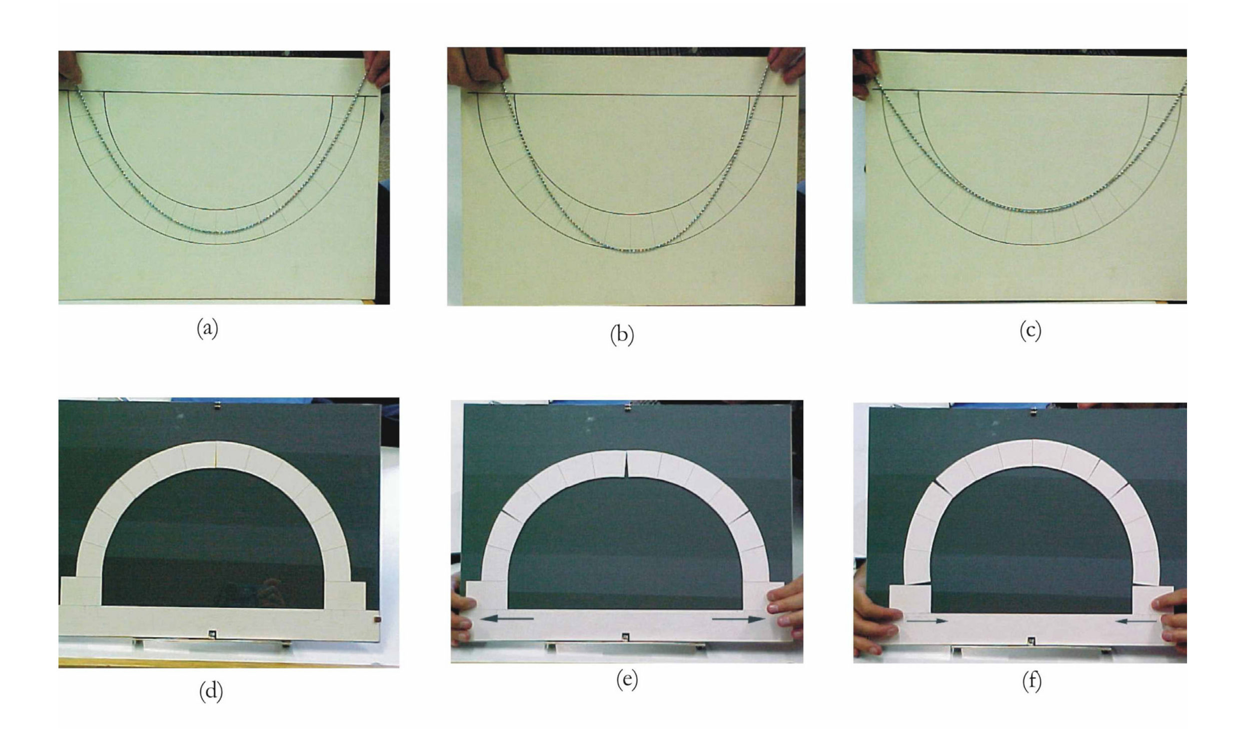


Figura 12. Arco invertido con una catenaria en su interior con su correspondiente modelo donde se pueden apreciar las grietas. (a) y (d) línea de empujes en el interior del arco; (b) y (e) línea de empuje mínimo; (c) y (f) línea de empuje máximo (Huerta 2005)

Gregory, en 1697, añade a la afirmación de Hooke: "y si arcos de otras formas se sostienen es porque hay una catenaria en su interior". Construir un arco con forma catenaria es muy complicado, porque todas las dovelas serían distintas. Sin embargo hay arcos que se adaptan mejor a la forma de la catenaria, como son los arcos apuntados (figura 13).

---

[1] El empleo de la cadena invertida se usó de manera práctica para obtener el perfil de la escalera construida en el taller, ver figura 28b.

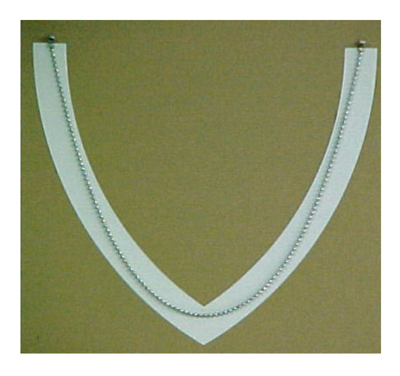


Figura 13. Arco apuntado con una catenaria en su interior (Huerta 2005)

Agrietamiento de arcos

El arco normalmente se construye sobre una cimbra. Al descimbrar, el arco empieza a empujar y los apoyos inevitablemente cederán ligeramente aumentando la luz. Para que se produzca este incremento de luz el arco debe agrietarse. Las grietas no sólo son normales en las estructuras de fábrica, sino que son necesarias para que la estructuras pueda acomodarse a estos movimientos.

En el arco de la figura 14, cuando los apoyos ceden ligeramente, se abren tres rótulas, una en la clave hacia el interior, y dos en los arranques, hacia afuera. La línea de empujes tiene que pasar necesariamente por estas rótulas, y en este caso la línea de empujes sí está definida. En este caso estamos ante la línea de empuje mínimo.

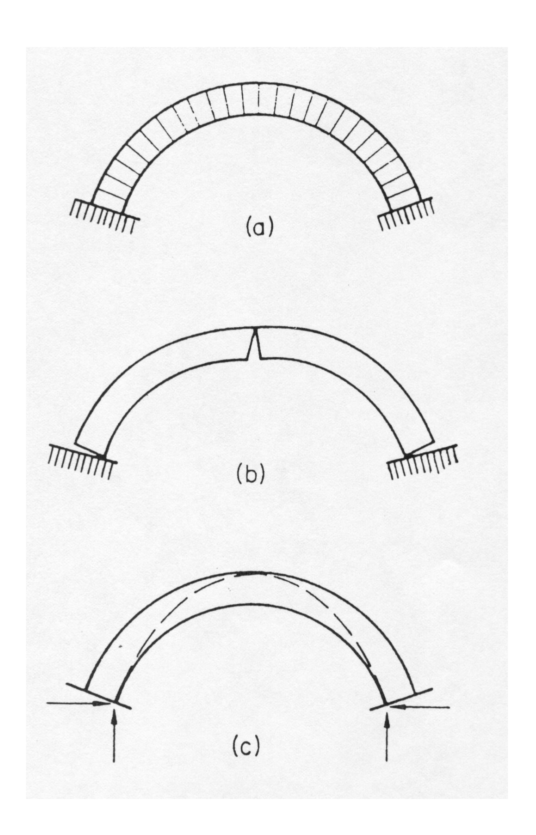


Figura 14. Movimiento que se produce para una ligero cedimiento de los apoyos en un arco rebajado, es decir, para la línea de mínimo empuje (Heyman 1969)

La posición de las rótulas depende de la forma del arco. En la figura 14 (c) tenemos el caso del arco rebajado. En el caso del arco de medio punto, para un cedimiento de los apoyos las grietas no se producen en los arranques, sino un poco más arriba. Si los apoyos se acercan, tendremos la línea de empuje máximo. En este caso se producen dos grietas en los arranques hacia dentro, y otras dos hacia afuera en la zona de la clave (figura 15). Estas grietas que tienen el mismo sentido equivalen en realidad a una, y lo habitual en un caso real es que se abra sólo una de ellas en cuanto haya un movimiento ligeramente asimétrico.

Es importante señalar que las deformaciones elásticas del material en una estructura de fábrica son mínimas. Las deformaciones que vemos son debidas a un cambio en la geometría de la estructura.

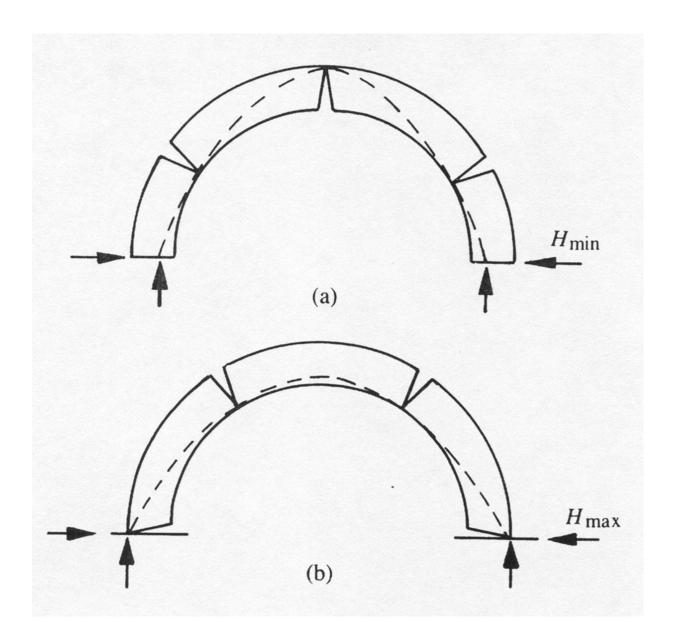


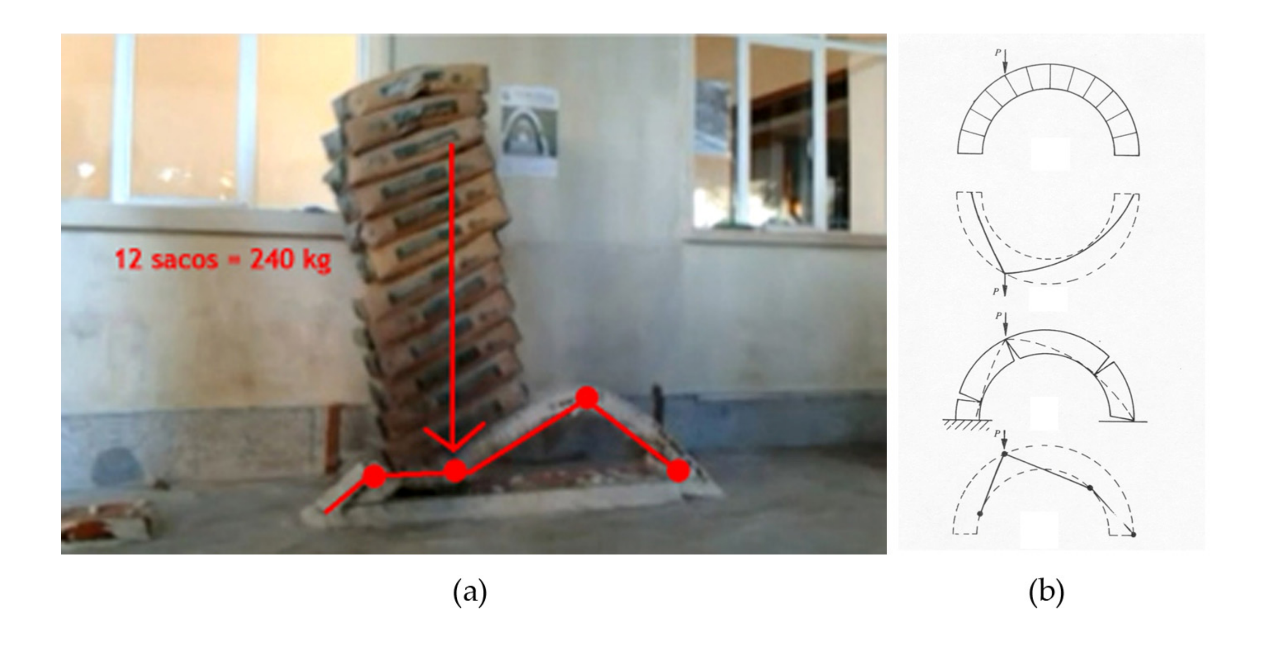
Figura 15. Movimiento que se produce para una ligero cedimiento de los apoyos en un arco de medio punto, es decir, para la línea de mínimo empuje (Heyman 1999)

Colapso de arcos

El colapso de un arco se produce cuanto se forman el número suficiente de rótulas o articulaciones que transforman la estructura en un mecanismo cinemáticamente admisible. En un arco, el número de rótulas necesarias es cuatro.

Para entender la forma de colapso de un arco podemos volver a utilizar la analogía de la cadena de Hooke. Tenemos un arco, con una cadena que representa la línea de empujes. Colgamos un peso de la cadena, lo que equivaldría a una carga puntual sobre el arco. La cadena cambiará de forma con este peso. Si hacemos aumentar la carga, la cadena se va aproximando a

los bordes del arco, y para un cierto valor de la carga la cadena toca en cuatro puntos, alternativamente en el interior y el exterior. Estos cuatro puntos forman las articulaciones que convierten el arco en un mecanismo. En la figura 16 se puede ver la imagen de un arco tabicado construido en el taller que rompe por la formación de rótulas.



(a) (b)

Figura 16. (a) Ensayo de carga sobre un arco tabicado construido en el taller donde se pueden apreciar las cuatro rótulas; (b) Colapso de un arco sometido a una carga puntual (Heyman 1999)

Teoremas fundamentales del análisis límite

El desarrollo de la teoría del Análisis Límite o cálculo plástico dio lugar al enunciado de tres teoremas fundamentales:

- el de la *unicidad*, que establece que la carga de colpaso es única

-el del *límite superior*, que establece que para un cierto mecanismo de colapso arbitrariamente elegido, la carga de colapso calculada será igual o superior a la real

-el del *límite inferior* o de la *seguridad*. Este último es el que nos interesa, y dice que si es posible encontrar un sistema de esfuerzos internos en equilibrio con las cargas, siempre que no se viole la condición de cedencia del material, la estructural será segura. Si esto lo traducimos para un arco de fábrica, el sistema de esfuerzos internos en equilibrio con las cargas es la línea de empujes, y la condición de cedencia del material es que no puede trabajar a tracción, por lo que un arco será seguro si podemos dibujar una línea de empujes en su interior. Esto quiere decir que la solución no tiene que ser real, sólo tiene que ser posible.

3. MECÁNICA DE BÓVEDAS TABICADAS

Las bóvedas tabicadas son estructuras de fábrica: están formadas por ladrillos y un mortero, usualmente yeso aunque también puede ser cemento rápido para la primera hoja y cualquiera (cal, cemento) para las siguientes.

Su funcionamiento, por lo tanto, es el mismo que el de cualquier otra estructura de fábrica: elevada resistencia a compresión y muy baja resistencia a tracción. Y, aplicando el análisis límite, la condición que permite afirmar que una bóveda tabicada es segura es la misma que para el resto de estructuras de fábrica: encontrar un sistema de esfuerzos internos en equilibrio con las cargas que no se viole la condición de cedencia del material.

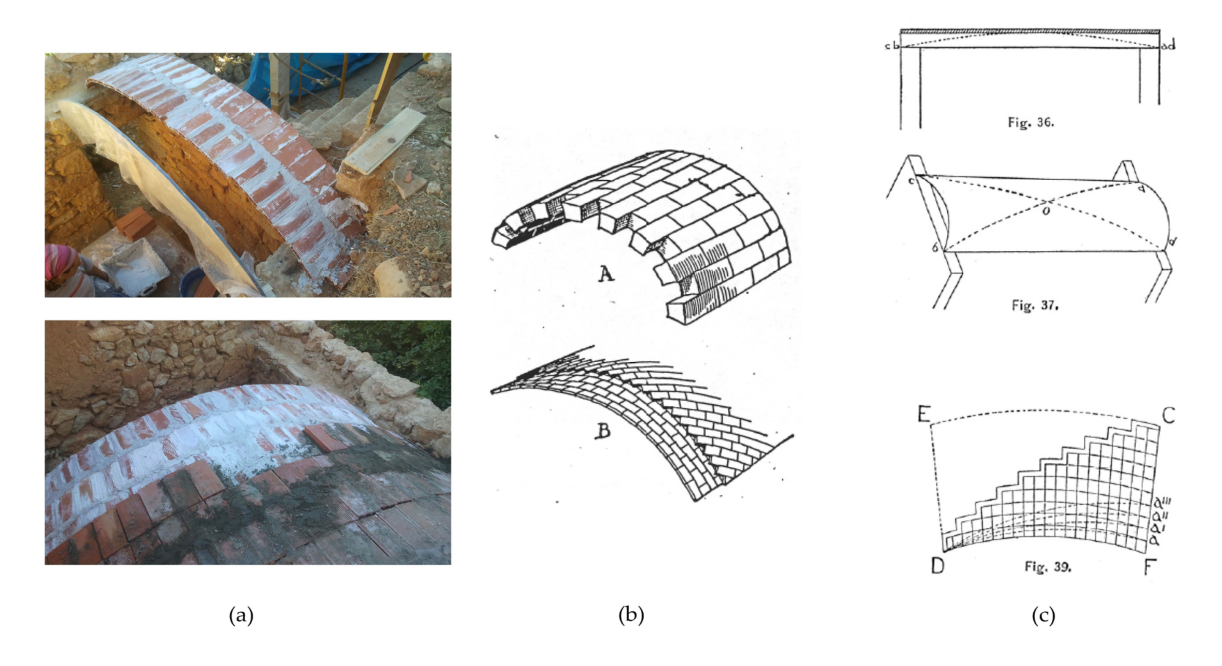


Figura 17. (a): Materiales que componen una bóveda tabicada: ladrillos y yeso para la primera hoja, ladrillos y cemento para la segunda. (b): Diferencia en la composición y en la esbeltez entre una bóveda de piedra y una tabicada de ladrillo (Moya 1947, 19). (c): Dibujos explicativos de Guastavino (1893, 84-85) acerca del comportamiento bidireccional de una bóveda tabicada formada por varias hojas.

Respecto a los factores que afectan al análisis estructural de una fábrica, las únicas diferencias que encontramos entre las bóvedas tabicadas y otras estructuras de fábrica son:

-Que suelen ser mucho más esbeltas, al menos aparentemente

-Que, debido a su esbeltez, pesan muy poco.

-Que, debido a su composición en varios gruesos de ladrillo, normalmente con las juntas contrapuestas, les es más fácil desarrollar un comportamiento bidireccional, a modo de membrana o lámina.

¿Cómo afectan estas diferencias al análisis de una bóveda tabicada?

La esbeltez

La extrema esbeltez de las estructuras tabicadas y de los muros en los que apoyan ha dado lugar a un debate histórico acerca de si su funcionamiento estructural es el mismo que para el resto de estructuras de fábrica (trabajo sólo a compresión) o si son diferentes, pudiendo desarrollar esfuerzos de tracción y, en consecuencia, de flexión. Pero veremos a continuación que esta esbeltez es sólo aparente y que siempre es posible encontrar una solución de equilibrio con el material trabajando sólo a compresión.

El arco límite

Se llama arco límite al que tiene el espesor mínimo necesario para ser estable. Para obtener este espesor hay que definir la forma del arco y el tipo de carga que debe resistir. En Heyman (1977) se expresa en forma de tabla este espesor para arcos semicirculares sometidos a peso propio, que crece exponencialmente con el ángulo de apertura del arco., ver figura 18(c). Esto ocurre porque para arcos muy rebajados (con un ángulo de apertura pequeño) la catenaria (línea de empujes del peso propio del arco) es casi coincidente con el arco de círculo; ocurre lo mismo con una parábola (línea de empujes de una carga uniforme).

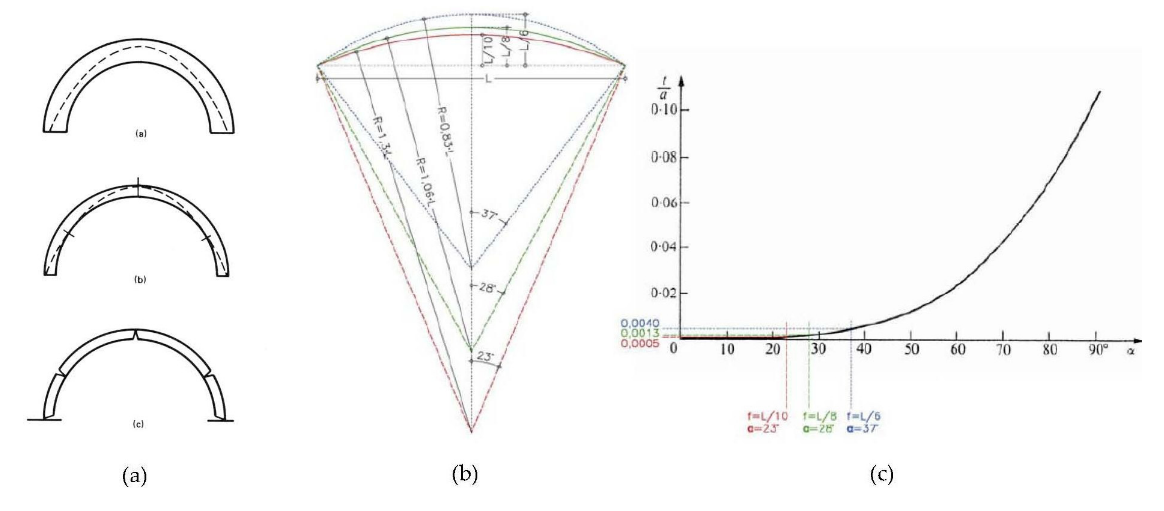


Figura 18. (a): Concepto de arco de espesor límite (Heyman, 1999). (b): Relación entre ángulos de apertura y relaciones flecha/luz para distintos arcos circulares. (c): Obtención del espesor límite para estos arcos a partir de la tabla de Heyman (1977, 80)

Entonces, un arco de círculo rebajado puede ser muy delgado si sólo va a estar sometido a su peso propio o a cargas uniformes.

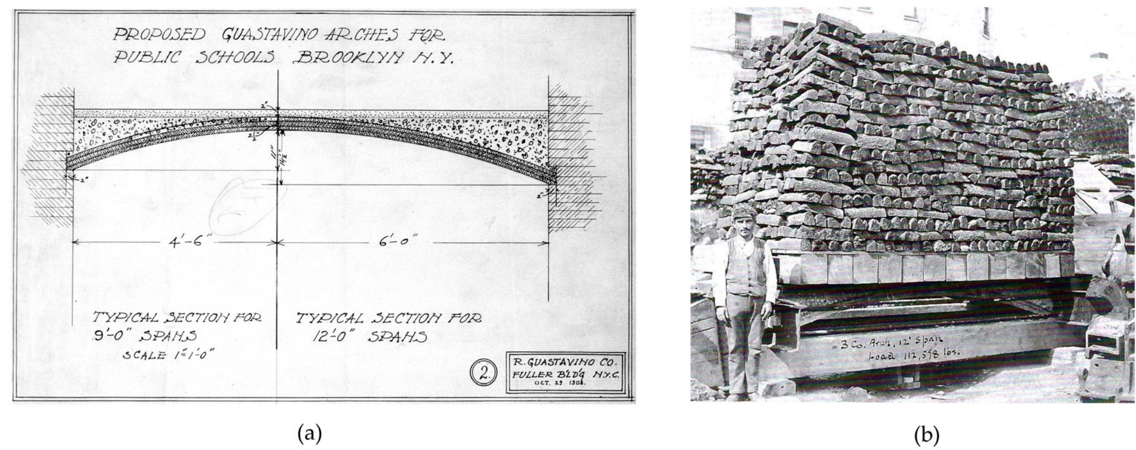
-para flecha 1/10 de la luz, el cociente espesor/radio es 0,0005: una bóveda de 10 m de luz (R=13 m) y flecha 1 m tiene un espesor límite de 6,5 mm.

-para flecha 1/8 de la luz, el cociente espesor/radio es 0,0013: una bóveda de 10 m de luz (R=10,6 m) y flecha 1,25 m tiene un espesor límite de 13,7 mm.

-para flecha 1/6 de la luz, el cociente espesor/radio es 0,004: una bóveda de 10 m de luz (R=8,3 m) y flecha 1,67 m tiene un espesor límite de 33 mm.

Estos espesores son mucho menores de los que tiene una bóveda tabicada habitual, formada por dos o tres hojas de ladrillo recibidas con yeso o cemento, que suman unos 8 o 10 cm, que por tanto es estable bajo carga uniforme o peso propio.

En el siglo XIX fue muy habitual este tipo de arco tabicado y muy rebajado. Guastavino construye en Estados Unidos numerosos arcos con flecha 1/10 de la luz. Esta es una razón por la que pueden resistir cargas inmensas siendo tan delgados, ver figura 19(b).



(a) (b)

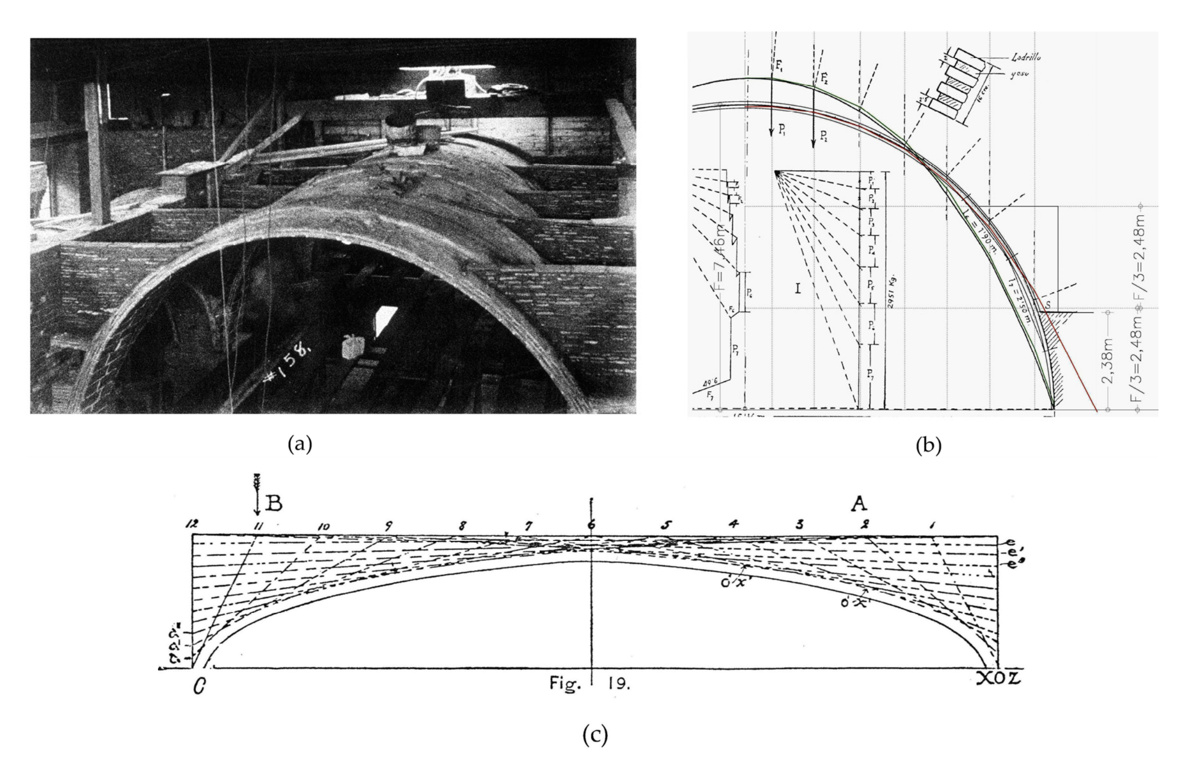
Figura 19. (a): Arcos tabicados rebajados construidos por Guastavino en las escuelas públicas de Brooklyn. (b): Ensayo de carga sobre un arco tabicado muy rebajado. (Archivo Guastavino/Collins, Universidad de Columbia).

Rellenos y lengüetas

Todos los tratados de arquitectura indican la necesidad de rellenar los riñones de las bóvedas hasta 1/3 de su altura y de construir tabiquillos, llamados costillas o lengüetas, hasta 1/3 más. Así lo cita Fray Lorenzo de San Nicolás en 1639. Y así están construidas todas las bóvedas tabicadas

Los rellenos y las lengüetas incrementan el espesor de la bóveda: si la línea de empujes está contenida en ellos, la bóveda sigue siendo segura. Y se colocan en la zona inferior porque, en un arco de ½ punto, muy habitual en la arquitectura histórica, es ahí donde el perfil del arco se separa de la forma ideal, catenaria o parabólica. Rellenar 1/3 de la altura y poner lengüetas en 1/3 más supone pasar la flecha de L/2 que tiene un arco de ½ punto a L/6, ya que sólo el tercio superior queda libre. Y así, como se ha explicado en el apartado anterior, reducimos el espesor del arco límite desde una relación espesor/radio de 0,55 (55 cm para una luz de 10 m) hasta 0,004 (3,3 cm para una luz de 10 m).

Otra función adicional de rellenos y lengüetas es mejorar el comportamiento de las delgadas bóvedas tabicadas frente a cargas asimétricas, ver figura 20.(c).



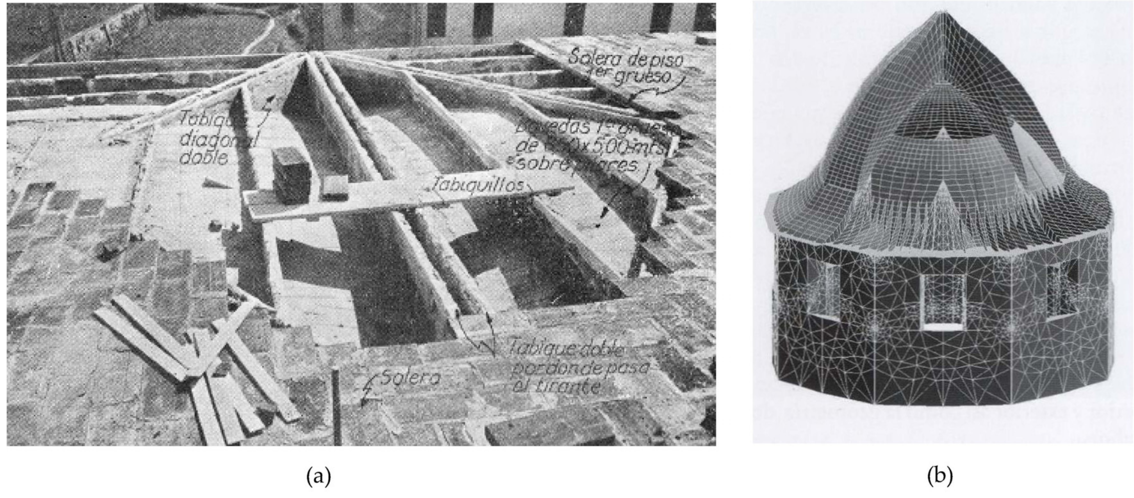
(a) (b)

(c)

Figura 20. (a): Lengüetas en una bóveda tabicada de la Biblioteca Pública de Boston, construida por Rafael Guastavino en 1889. (b): Análisis de equilibrio de una bóveda tabicada en Barcelona: sin la colaboración de rellenos y lengüetas, es imposible dibujar una línea de empujes dentro del arco. (c): Dibujo de Guastavino (1893, 63) en el que explica como en el espesor de una bóveda con lengüetas hasta la clave es posible dibujar una línea de empujes para cualquier carga puntual asimétrica

Secciones dobles

Muchas bóvedas tabicadas son una sección de doble hoja, conectadas entre si mediante tabiquillos o llaves metálicas.



(a) (b)

Figura 21. (a): Forjado tabicado de doble hoja construida por Ignacio Bosch Reitg en Gerona (Bosch 1949, 190). (b): Cubierta de la iglesia arciprestal de Villareal: bóveda tabicada doble conectada por tabiques (Zaragozá 2012, 188)

Estas secciones dobles resuelven muy bien los forjados (la hoja inferior es una bóveda y la superior es plana y sirve de base para el pavimento) y las cubiertas (se forma una cámara interior que mejora la impermeabilidad y el aislamiento térmico). Pero además, la doble hoja forma una sección hueca, que trabaja conjuntamente, muy ligera, resistente y rígida.

Estabilidad de muros

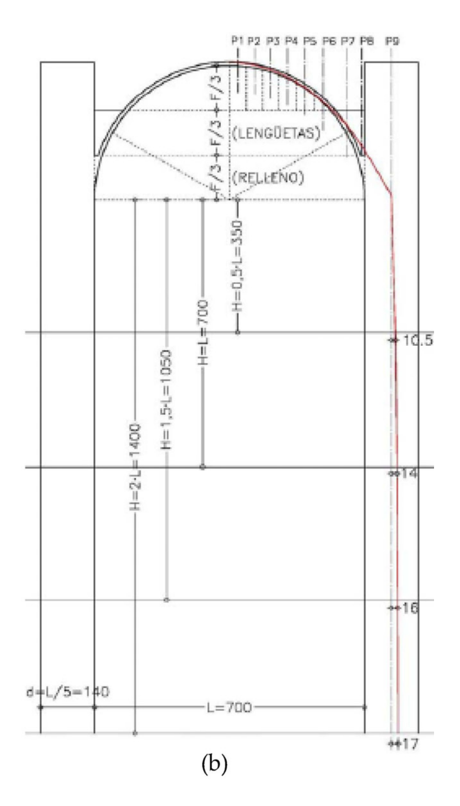
Las bóvedas tabicadas, precisamente por ser tan delgadas, pesan poco, mucho menos que las de piedra o la de rosca de ladrillo. Y por eso, los muros en los que apoyan pueden ser más delgados que el resto.

Esto ya lo afirman los tratadistas antiguos, como Fray Lorenzo de San Nicolás, en 1639; todavía no se conocía el concepto de línea de empuje y los edificios se diseñaban con ayuda de reglas de proporción: Fray Lorenzo indica el espesor necesario para los muros que soportan una bóveda tabicada (L/5), menor que para una bóveda de rosca de ladrillo o de piedra, ver figura 22(a).

quando la bobe-
da huuiere de ſer tabicada de ladrillo, baſta que lleuen las paredes
de grueſſo la octaua parte de ſu ancho, que es de quarenta, cinco
pies de grueſſo, y los eſtriuos ſe cumplan con el grueſſo, haſta la
quarta parte de ſu ancho. Si en el Templo, cuyas bobedas han de
ſer tabicadas, no pudiere auer eſtriuos, tendràn de grueſſo las pare-
des la quinta parte de ſu ancho

Material	*Muro uniforme*	*Muro*	*Muro + estribos*
Piedra	*L/3*	*L/6*	≥ *L/3*
Rosca de ladrillo	*L/4*	*L/7*	*L/3*
Tabicada	*L/5*	*L/8*	*L/4*

(a)



(b)

Figura 22. (a): Recomendaciones de Fray Lorenzo de San Nicolás (1639) acerca del espesor necesario en muros: arriba el texto original, abajo en formato tabla (Huerta 2004, 244). (b): Comprobación de las proporciones mediante un análisis de equilibrio: para espesor L/5, se obtiene un coeficiente de seguridad geométrico de 4,12.

Las proporciones pueden comprobarse ahora, con ayuda de las líneas de empuje. En la figura 22(b) se analiza una iglesia con la proporción indicada por Fray Lorenzo: espesor de muro L/5. Se obtiene un coeficiente de seguridad geométrico de 4,12: El muro es estable y

además la línea de empujes pasa lo suficientemente lejos del borde del muro para que el apoyo en el terreno sea correcto.

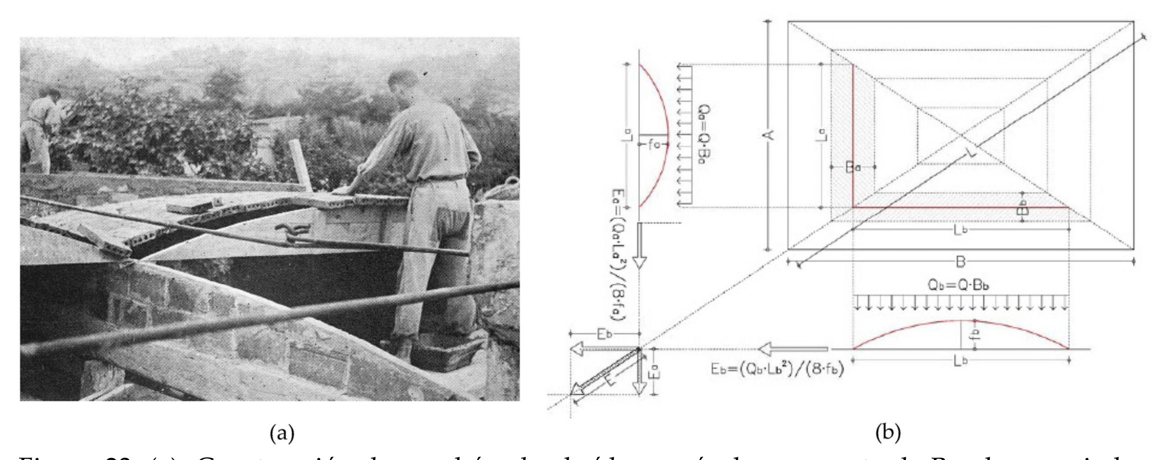
Método de los cortes

Para analizar una bóveda o cúpula tabicada podemos aplicar el método de los cortes, aplicación en varios planos del análisis límite de fábricas (el método de los cortes se desarrolla en Heyman 1999). En una misma bóveda podemos encontrar infinitos sistemas de corte; aplicando el teorema de la seguridad, si encontramos una solución de equilibrio posible, la estructura también encontrará al menos esa solución y será estable.

En los escritos de varios constructores de bóvedas tabicadas encontramos aplicaciones del método de los cortes. El más relevante es el que propone Ignacio Bosch para sus bóvedas baídas.

Ignacio Bosch Reitg: Bóvedas baídas o de «cuatro puntos»

Bosch propone una división de la bóveda en fajas curvas concéntricas al perímetro. Estudia cada faja por separado y luego transmite la reacción a las diagonales, que llevan la carga hasta los pilares. Para que el empuje final E esté orientado según la dirección de la diagonal, es preciso que la relación entre los empujes *Ea* y *Eb* sea la misma que entre los lados de la planta A y B (*Ea*/*Eb*=A/B). Y esto ocurre cuando las flechas *fa* y *fb* sean iguales.



(a) (b)

Figura 23. (a): Construcción de una bóveda «baída» según la propuesta de Bosch: una cimbra ligera se desplaza por un arco construido con esa misma forma (Bosch 1949, 187). Las flechas de los arcos son iguales en las dos direcciones. Así puede aplicarse el sencillo análisis por fajas que propone a la derecha. (b)

Esto se consigue con el método constructivo que propone Bosch, dos cimbras iguales que se desplazan una sobre otra. Así el empuje total puede calcularse de manera muy rápida con la fórmula del empuje parabólico:

$$E = \frac{Q \cdot A \cdot B \cdot L}{2 \cdot 8 f}$$

(*Q* es la carga superficial en la bóveda, *A* y *B* sus lados, *L* la luz del arco diagonal y *f* la flecha común a todos los arcos)

Comportamiento bidireccional

Pero además del análisis por cortes, que supone que las bóvedas trabajan en planos distintos apoyando unos en otros, las bóvedas tabicadas también pueden desarrollar un comportamiento realmente bidireccional, teniendo en cuenta la colaboración conjunta de ambos planos. El método más empleado es el análisis de membrana, especialmente aplicado a cúpulas.

La teoría de la membrana

El análisis de membrana consiste en buscar una solución de equilibrio con esfuerzos axiles, de compresión y de tracción, contenidos en la superficie media de una cáscara, de manera que no aparecen momentos flectores ni esfuerzos cortantes.

Que exista o no esta solución de equilibrio depende de las cargas, de los apoyos y sobre todo, de la geometría de la cáscara. Normalmente existe en las superficies de doble curvatura. Para cáscaras de revolución, como las cúpulas, existe, y podemos definir dos familias de fuerzas: las meridianas ($N\varphi$) y las paralelas ($N\theta$), que equilibran cualquier elemento de la estructura.

Análisis de membrana de cúpulas tabicadas

El análisis de membrana, mediante procedimientos gráficos, se utilizará en la primera mitad del siglo XX para analizar cúpulas tabicadas. En el caso usual de una cúpula esférica, ya no se comporta como una serie de gajos inconexos (esta sería la manera de dividir una cúpula siguiendo el método de los cortes) sino como una superficie. La solución de equilibrio en membrana requiere la colaboración de los paralelos en compresión en la zona superior de la cúpula y en tracción en la zona inferior. El punto en el que se pasa de paralelos comprimidos a traccionados está a unos 52° del eje.

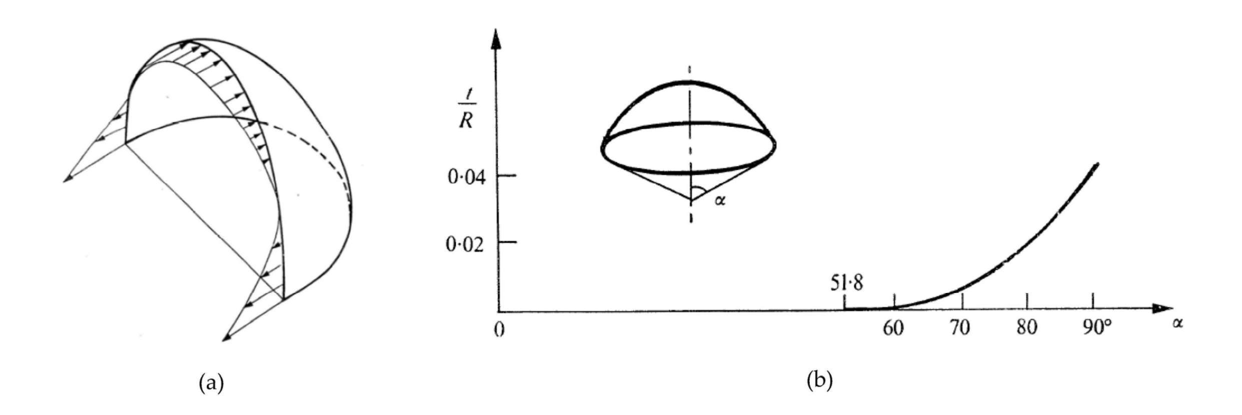


Figura 24. (a): Dirección de las fuerzas paralelas en una cúpula esférica (Heyman 1077, 106). El punto en que pasan de compresiones a tracciones está a 52° de eje, por eso hasta ese ángulo el espesor mínimo puede ser 0. (b): Espesor mínimo necesario para cúpulas esféricas sometidas a peso propio (Heyman 1977, 111).

Igual que en los arcos, podemos dibujar en una tabla el espesor límite de una cúpula semiesférica. Para ángulos de apertura menores de 52°, el espesor teórico de una cúpula de fábrica puede ser 0, ya que el posible encontrar una solución de equilibrio, con compresiones según los paralelos y los meridianos, en la superficie media de la cúpula. A partir de ese ángulo, el espesor va creciendo pero es menor que en los arcos.

Los Guastavino construyeron esbeltísimas cúpulas tabicadas en Estados Unidos. Conocían y aplicaban el análisis de membrana: sus cúpulas son muy delgadas cuando son rebajadas, con ángulos de apertura menores de 52°. Cuando no son tan rebajadas, regruesan o arman la zona inferior; otro recurso que emplean es cambiar la forma de la cúpula, que pasa de tener perfil semicircular a catenario a partir de esos 52°

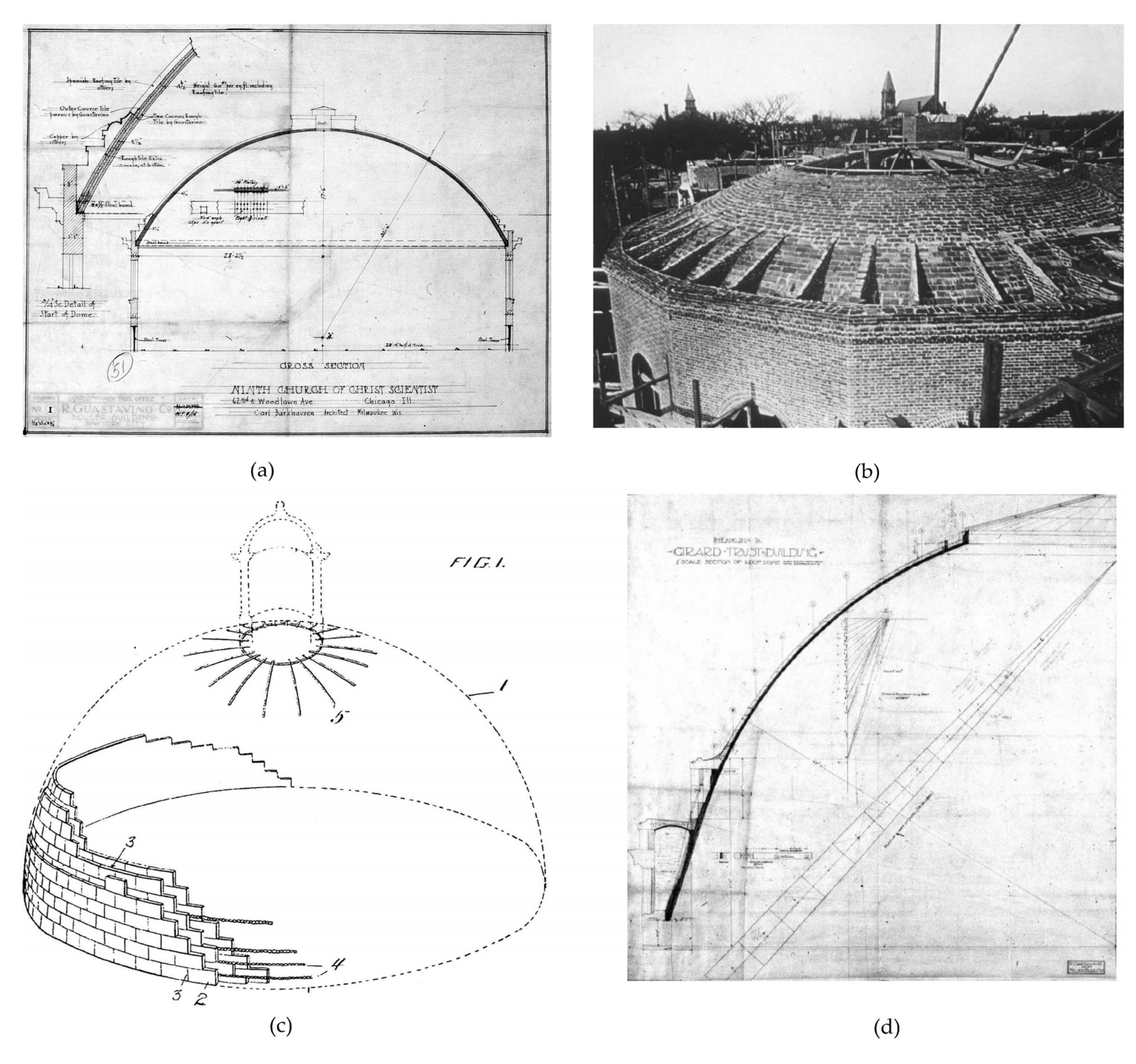


Figura 25. Cúpulas y planos de cúpulas construidas por los Guastavino en Estados Unidos (Archivo Guastavino/Collins, Universidad de Columbia). (a): Cúpula rebajada, con ángulo de apertura menor de 52°: puede ser muy delgada, aunque necesita un importante zuncho metálico en el apoyo. (b): Cúpula «regruesada», en este caso con lengüetas, en la zona inferior. (c): Cúpula semiesférica armada según los paralelos en la zona inferior. (d): Cúpula con perfil circular arriba y catenario abajo, a partir de los 52°: con este cambio de forma se evita la aparición de tracciones en la cúpula.

4. DESARROLLO DEL TALLER 2013/14

El «Taller de construcción sin cimbra». formá parte de la asignatura «Taller experimental», englobado dentro de un grupo conjunto llamado «Taller de Historia de la Construcción», en el que también se desarrolló un taller de cantería, otro de carpintería y otro de bóvedas góticas. Los alumnos que la cursan están en 4° de Arquitectura.

Los alumnos matriculados en el taller en el 2º cuatrimestre del curso 2013-2014 fueron 23. Se dividieron en 4 grupos. Cada día 2 grupos iban al taller de construcción (que se cuenta con detalle a continuación) y los otros 2 se quedaban en aula, donde recibían una mínima formación teórica acerca de historia y mecánica de la construcción tabicada (que se cuenta en los capítulos 1, 2 y 3) y desarrollaban sus trabajos de investigación (que se explican en el capítulo 6) y sus proyectos de bóvedas (en el capítulo 7).

Los alumnos del taller y los grupos, fueron los siguientes:

Grupo 1
- Filippone, Giulia
- Gallardo Moreno, Alejandro
- González Lara, Ana
- González Mariñas, María
- Lucía Cermeño, María
- Mateos Rodríguez, Adrián

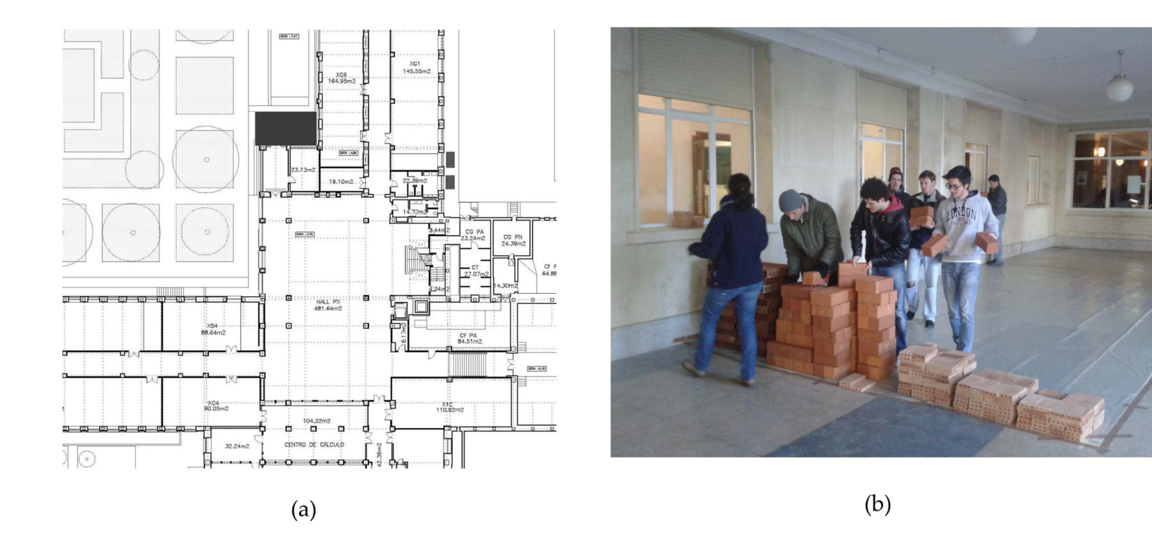
Grupo 2
- Clemente Arnaiz, Iñigo
- Escribano Gallardo, José Joaquín
- Gonzálvez Sánchez, Elisa
- Ingmo, Víctor
- Lien, Jonathan
- Lope de Toledo, Iñigo

Grupo 3
- Aguirre González, Cristina
- Arribas López, José María
- Barbero Ozaita, Catalina
- García Melgar, Noemí
- López Martín, Sergio

Grupo 4
- Buñola Pedrol, Aina
- Domínguez Pérez, Patricia
- Hidalgo Romero, Cristina
- Juez Martínez, Patricia
- Moore de la Torre, Coral

La parte más novedosa de este taller consistió en la aplicación práctica de los contenidos teóricos. Los alumnos construyeron durante el taller diversas bóvedas tabicadas, empezando por algunos arcos y bóvedas sencillos para finalizar con otras de mayor tamaño y dificultad. El taller de construcción estaba en marcha todos los días, y los alumnos acudían en días alternos, dos grupos cada día. Así conseguimos un número adecuado de alumnos en el taller (10-12).

El taller de construcción se realizó en un porche abierto al jardín trasero de la ETSAM. La situación era óptima ya que el taller tenía mucha visibilidad, y estábamos al aire libre pero protegidos de la lluvia. El primer día de trabajo fue el 19 de febrero de 2014.



(a) (b)

Figura 26. (a): Situación del taller en la ETSAM: es la zona marcada con negro. (b): El taller al inicio de la construcción, los alumnos apilando ladrillos

En todas las clases del taller de construcción contamos con la ayuda imprescindible de Carlos Martín. Es el director de la empresa CREA, dedicada a la restauración del patrimonio arquitectónico y especializada en yesos; su experiencia en construcción de bóvedas tabicadas y su paciencia han sido fundamentales para el éxito del taller.

Los resultados del taller se han ido recogiendo en un blog, creado día a día fundamentalmente por los alumnos:

bovedastabicadas.wordpress.com

Construcciones previas: arcos y escaleras

Para acostumbrarnos a trabajar con los materiales, yeso y ladrillo, se comenzó con la construcción de unos pequeños arcos sobre cimbra y unas bóvedas de escalera construidas al aire. La parte más dificil al principio es acostumbrase al trabajo con el yeso, ver figura 27.a : fragua realmente rápido y hay que hacer pequeñas cantidades para no tener que tirarlo una vez seco sin usar. También es importante controlar la relación agua/yeso y no batirlo para mezclarlo bien, ya que entonces se acelera el fraguado

Bóvedas para escalera

Se construyen dos, una por cada lado de un muro en T de rasillones. La construcción del muro, más sencillo que una bóveda, sirve también como toma de contacto con los materiales.

El proceso de replanteo de la bóveda es el siguiente: concluida la L de muros en la que la escalera va a apoyar, se enyesa en lado largo, ver figura 28(a); la forma de la bóveda se marca con la ayuda de una cuerda colgante de los puntos de inicio y fin, ver fig. 28(b). Sobre la forma



(a) (b)

Figura 27. (a): Carlos Martín construyendo los muros de apoyo para las bóvedas de escalera. (b): Los alumnos comienzan a trabajar, preparando el yeso y colocando ladrillos de los muros.

catenaria así obtenida, se dibuja la curva inversa. Y ya puede empezar a colocarse la primera fila de ladrillos, ver figura 28(c). Como van al aire, es importante que el lado largo del ladrillo sea el que apoye en el muro, para tener más superficie de contacto y menos longitud de ladrillo volada.



(a)

(b) (c) (d)

Figura 28. Distintos momentos de la construcción de una bóveda tabicada para escalera y el peldañeado que va por encima

Completada la bóveda, se replantean en el muro lateral enyesado los peldaños. Este replanteo debería haberse hecho de manera conjunta con la forma de la bóveda: al hacerlo después y plantear peldaños iguales, los peldaños se separan excesivamente de la bóveda en la zona superior, ver figura 29(a). A pesar de estos fallos, el equipo de alumnos posa orgulloso delante de su «obra». Incluso se lanzan a una prueba de carga espontánea, ver figura 29(b)



(a)



(b)

Figura 29. (a): Bóveda de escalera finalizada. (b):Prueba de carga espontánea.

Arcos

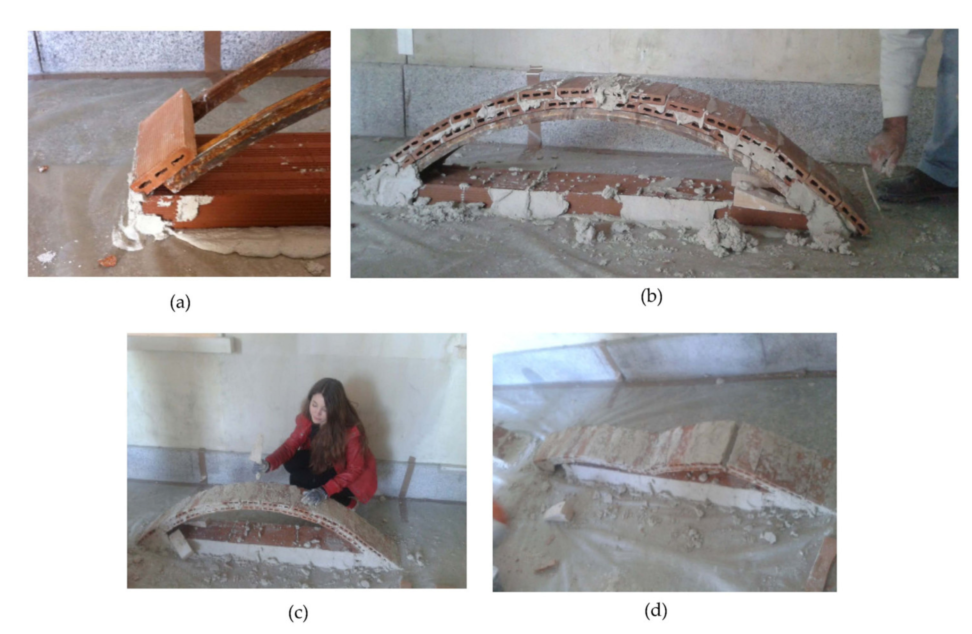
En paralelo a estas bóvedas de escalera, se construyen pequeños arcos, de 120 cm de luz y 20 cm de flecha, apoyados sobre el suelo. Estos arcos son más sencillos de ejecutar, por su tamaño y porque se apoyan sobre unas cimbras metálicas.

En la figura 30 se ve el proceso de construcción del primer arco que se construyó. No tuvimos mucho éxito ya que el arco se rompió nada más descimbrar. La razón fue una incorrecta ejecución de los apoyos; unido al bajísimo rozamiento entre el apoyo de yeso y el plástico colocado debajo para proteger el pavimento. El arco se abrió en cuanto se retiraron las cimbras.

A continuación se construyó otro arco idéntico con una ejecución más esmerada; resistió el descimbrado pero rompió por deslizamiento de los apoyos bajo el peso de una sola persona.

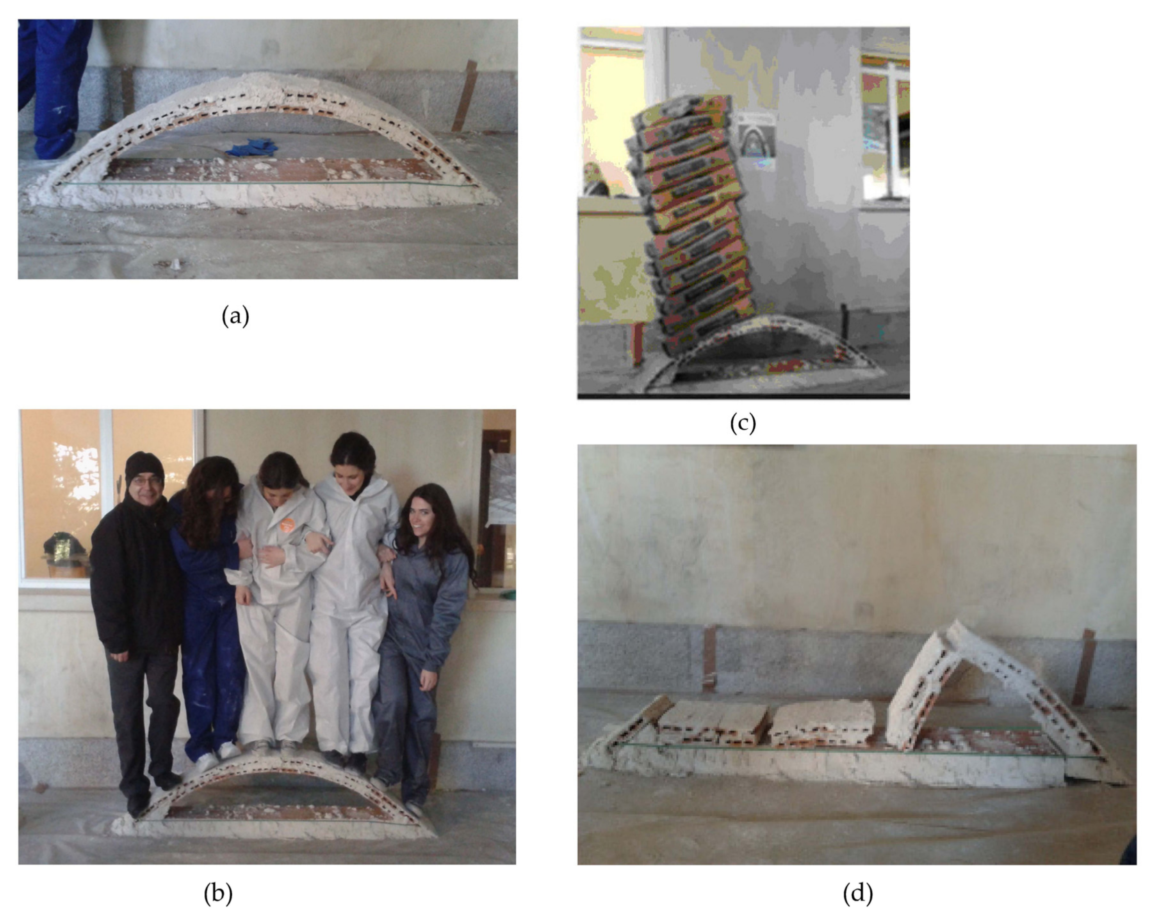
Para solucionar este problema del deslizamiento de los apoyos, el siguiente arco de esta serie se atirantó con una sencilla cuerda de tender tensada. Este nuevo arco, al tener impedido el movimiento de los apoyos, resistió cargas mucho más elevadas: se cargó con el peso de cinco personas encima. Al final, se rompió bajo la carga asimétrica de 12 sacos de yeso (240 kg). En la figura 31(c) se observa claramente que la rotura se produce por formación de 4 articulaciones, en los cuatro puntos en los que la línea de empujes ha tocado el borde del arco. Y en la 31(d) se observa el arco ya roto, en 4 fragmentos.

El peso de cinco personas supone una carga más o menos uniforme sobre la bóveda. La línea de empujes de esta carga es aproximadamente una parábola, que puede dibujarse con facilidad dentro del perfil del arco, circular y muy rebajado (relación flecha/luz= 20/120=1/6).



(a) (b) (c) (d)

Figura 30. Proceso de ejecución de un arco. (a): Detalle de las cimbras. (b): Remate del arco, a la derecha se observa la mala ejecución del apoyo. (c): Arco finalizado (d): Rotura del arco por deslizamiento tras descimbrar.



(a) (c) (b) (d)

Figura 31. (a): Arco atirantado. (b): Prueba de carga «uniforme» sobre el arco. (c): Rotura del arco bajo la carga, puntual y asimétrica de 12 sacos de yeso (240 kg). (d): El arco después de romper.

Sin embargo, el peso de los sacos de yeso es una carga puntual y asimétrica. La línea de empujes está formada por dos rectas y difícilmente cabe en el espesor del arco. La manera de mejor el comportamiento de esta bóveda frente a cargas asimétricas como esta sería, como se explicó en las clases de teoría, construir lengüetas hasta la clave del arco.

Bóveda de cuatro puntos

La geometría y la forma de construir está bóveda es la misma que emplea Ignacio Bosch Reitg en sus viviendas de Gerona: sobre cuatro machones atirantados en las esquinas se construyen cuatro arcos de cabeza; desplazando una de las formas que han servido para los arcos sobre dos de ellos se genera una superficie aproximadamente esférica pero más sencilla de construir con rasillas.

En este caso, la planta es rectangular, de lados 1,20 y 2,70 m. Para comenzar, se construyeron cuatro machones de ladrillo hueco doble de 80 cm de altura, ver figura 32 Sobre estos cuatro arcos se colocan dos cimbras metálicas en paralelo, parecidas a las empleadas para construir los pequeños arcos iniciales. Aunque en general no es necesario emplear cimbras en la construcción tabicada, en este caso se usan para que el arco tenga la forma prevista; además, agilizan mucho el proceso, ver figura 33.

Entre los machones de ladrillo y los arcos se intercalan unas cuñas metálicas: cuando la bóveda esté terminada se retiraran algunas de ellas para ver como responde a un descenso del apoyo.



(a)



(b)

Figura 32. (a): Inicio de la construcción de uno de los machones (b): Tres machones ya construidos. En el suelo se ven las cimbras metálicas que se van a emplear para construir los arcos de cabeza.



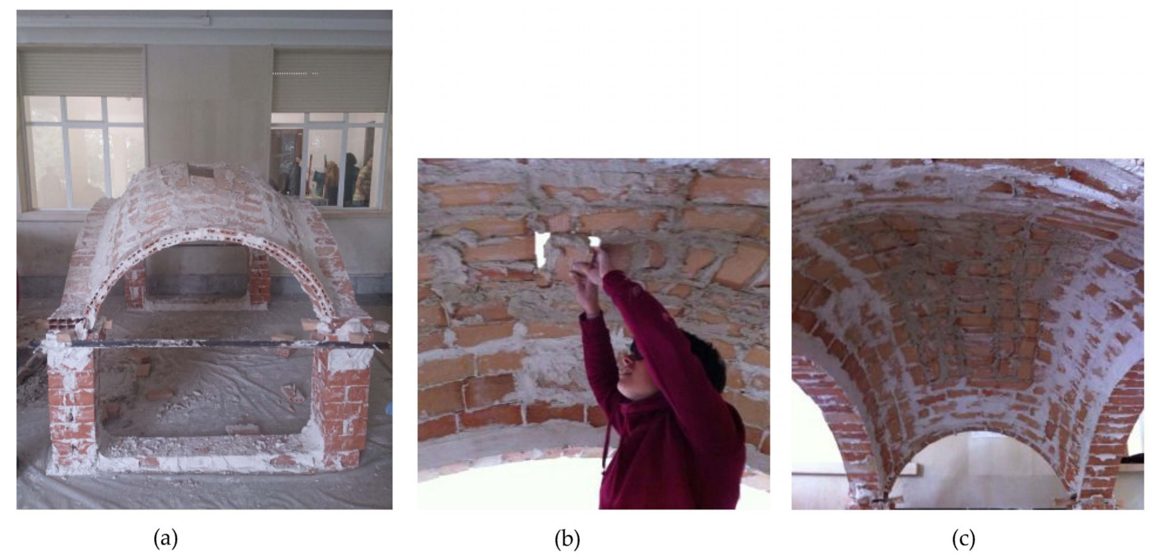
Figura 33. (a): Cimbra doble preparada para empezar la construcción de los arcos; para marcar la separación entre ellas, se coloca una rasilla sujeta con gatos. (b): Arco de cabeza del lado corto terminado. Estos arcos se construyen con dos gruesos de ladrillo. Debajo se ve la cimbra metálica; en los apoyos, las cuñas de madera. (c): Carlos Martín construyendo el arco de cabeza del lado largo

Una vez completados los arcos de cabeza, comenzamos la bóveda en sí, que se construye con una sola hoja de ladrillo. Ante la dificultad para desplazar y situar las cimbras metálicas, que son muy pesadas, para generar la superficie, decidimos construir sin ellas, al aire, el resto de la bóveda. En la figura 34 se ven fases intermedias de la construcción de esta bóveda. Las hiladas de ladrillo se van alternando: al principio son paralelas a los arcos largos y después a los arcos cortos. Para controlar la forma de la bóveda sin ninguna ayuda es importante la colocación de la primera rasilla de cada hilada: las esquinas que tocan con las hiladas anteriores deben quedar perfectamente alineadas.



Figura 34. (a): Los cuatro arcos de cabeza terminados y alguna hilada ya construida; los machones se han atirantado en la parte superior (b): Colocación de ladrillos al aire.

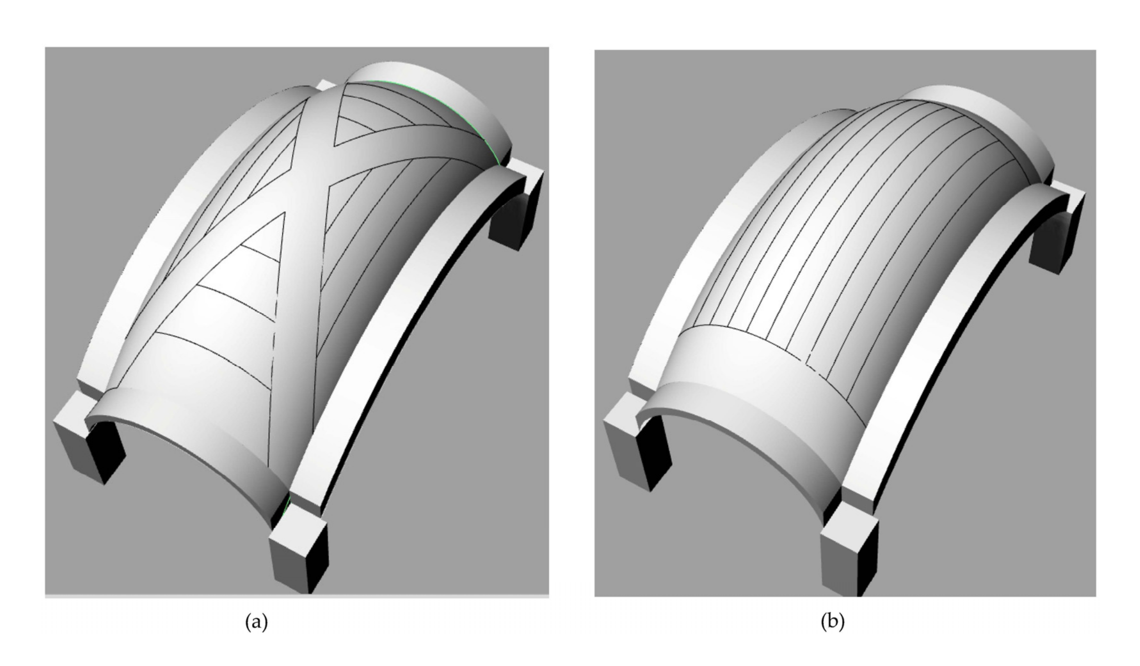
La decisión de construir la bóveda sin ayuda de cimbras y con «personal» poco experimentado lleva a imperfecciones geométricas, muy visibles en la figura 35(a). Pero la bóveda se cierra y estos fallos en la forma no merman su resistencia, como veremos en la descripción de su rotura.



(a) (b) (c)

Figura 35. (a): La bóveda a punto de terminarse: las hiladas de la izquierda han quedado más levantadas que las de la derecha. (b): Colocación del último ladrillo de la bóveda. (c): Vista inferior de la bóveda ya terminada; se puede observar la colocación alterna de las hiladas.

En las clases de teoría se ha comprobado la estabilidad de esta bóveda, aplicando el método de los cortes. Comenzamos con el sistema de cortes que emplea Bosch Reitg: división de la bóveda el fajas paralelas al perímetro que apoyan sobre las diagonales. Con este modelo la bóveda no es estable: la línea de empujes de las cargas se sale en el arco diagonal, ver figura 36(a). Se prueba entonces otro modelo: división en arcos paralelos al lado largo que apoyan en un arco de descarga que a su vez descansa en el arco del lado corto, ver figura 36(b). Con este sistema de cortes la bóveda sí es estable.



(a) (b)

Figura 36. (a): Sistema de cortes idéntico al empleado por Ignacio Bosch en sus bóvedas. (b): Sistema de cortes más sencillo, con arcos paralelos al lado corto apoyando en el arco corto a través de una zona de descarga.

Cúpula semiesférica

El siguiente proyecto que se construye es una cúpula, un pequeño panteón. En la figura 37 se dibuja la geometría y algunos detalles del proyecto: se levanta sobre unos muros de 72 cm de altura; el radio de la cúpula es 1,20 m, de manera que las dimensiones interiores del panteón son 2,40 m de diámetro y 1,92 m de altura. En los cuatro lados se dejan aberturas para acceder al interior. La cúpula tiene un óculo de 40 cm de diámetro. Se proyecta con dos hojas hasta la mitad de su altura y con una hoja en la zona superior; en el paso de una a dos hojas se coloca una pletina metálica. El perímetro del óculo se refuerza con una doble hoja.

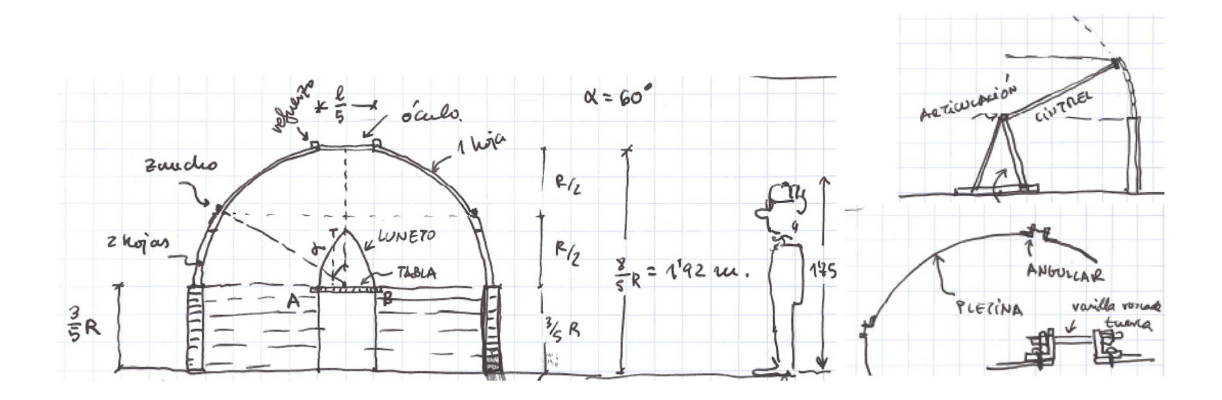


Figura 37. Proyecto de pequeño panteón. A la izquierda, sección; a la derecha, detalles del proceso constructivo y del zuncho metálico.

El inicio de la construcción son los muros, de planta circular, que sustentan la cúpula. Es un muro palomero de ladrillo hueco doble, ver figura 38(a). Una vez terminado, se construyen los dinteles para las cuatro aberturas: un arco de círculo muy rebajado. Encima se tiende una primera hilada de rasillas horizontales, que sirve para regularizar la forma, tanto en altura como



(a) (b)

Figura 38. (a): Construcción del muro palomero que sustenta la cúpula. (b): Muros de apoyo terminados, incluso con la hilada de regularización; en el centro se ve el machón de ladrillo con un palo de escoba que nos sirvió como instrumento de replanteo.

en la posición de la planta. Ya para esta hilada se usa el instrumento de replanteo que se ve en la figura 38(b): se levanta un machón de ladrillo perforado en el centro de la cúpula. El machón no está trabado, de manera que puede introducirse un palo (de escoba en este caso) en una de las perforaciones. A la altura de los muros exteriores (aproximadamente los 72 cm proyectados) se ata un hilo al palo. Este hilo servirá eficazmente de cintrel, como se verá más adelante.

La construcción de la cúpula avanzó muy rápido, por hiladas horizontales. Las primeras fueron las más fáciles, por que estaban a una altura idónea y por ser bastante grandes. La hilada se construye con ladrillos enteros, y sólo el de cierre se corta.



(a)



(b)

Figura 39. (a): Avance en la construcción de la cúpula. (b): Cierre de una de las hiladas, con un ladrillo partido

En las figuras 40 y 41 se observan distintos aspectos de la construcción de la cúpula, hasta su terminación.



(a)



(b)

Figura 40. (a): Empleo del hilo para situar correctamente cada ladrillo. (b): Vista de la construcción desde el interior. El óculo ya va tomando forma.

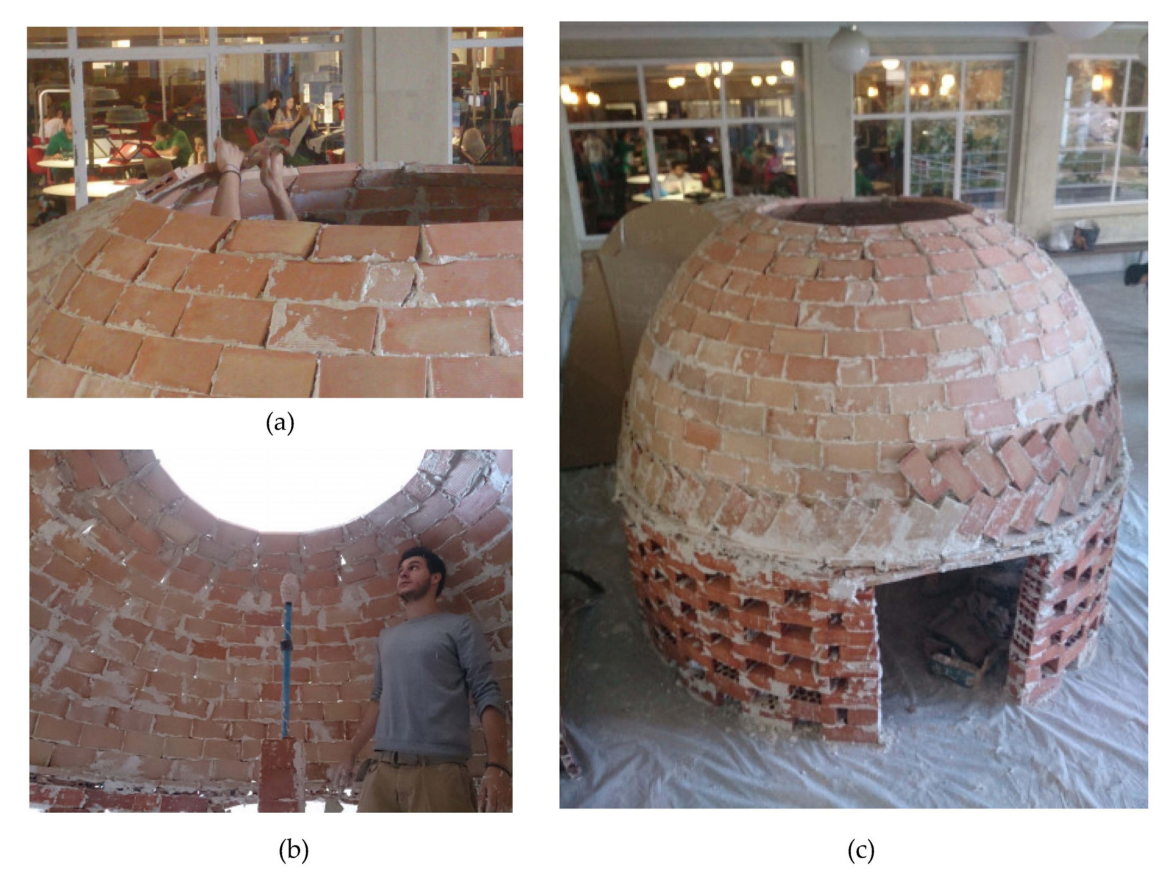


Figura 41. (a): Colocación de los últimos ladrillos. (b): Vista de la construcción desde el interior, ya casi terminada (c): Ídem desde el exterior.

A medida que avanza la construcción, se va haciendo más difícil: los ladrillos se colocan peor porque están cada vez más arriba y más horizontales; además, las hiladas se van haciendo más pequeñas y queda una superficie muy facetada. Aún así, el resultado final es muy bueno, ver figura 41(c). Los alumnos han adquirido mucha pericia en la construcción y una buena mecánica de equipo que les permite avanzar rápido y bien.

Durante el proceso constructivo, se produjeron algunos cambios con respecto al proyecto original: algunas medidas se adaptaron al tamaño de los ladrillos, por lo que la altura de los muros es algo mayor de los 72 cm previstos; finalmente no se colocó el zuncho metálico; en cuanto al doblado, no se llegó exactamente hasta la mitad de la altura, nos quedamos un poco mas abajo; los ladrillos del doblado se colocaron además siguiendo un aparejo en espina de pez, ver figura 41(c).

Al igual que con la bóveda de cuatro puntos, en las clases de teoría se comprobó la estabilidad de la cúpula. En un primer intento se emplea el método de los cortes, ver figura 42.

En este análisis se divide la cúpula en 32 gajos independientes que funcionan como arcos. Se calculan sus pesos y se tantean varias líneas de empujes, siendo imposible dibujar ninguna en el espesor de la cúpula. En el análisis no se ha tenido en cuenta el efecto del zuncho metálico, que finalmente no se colocó.

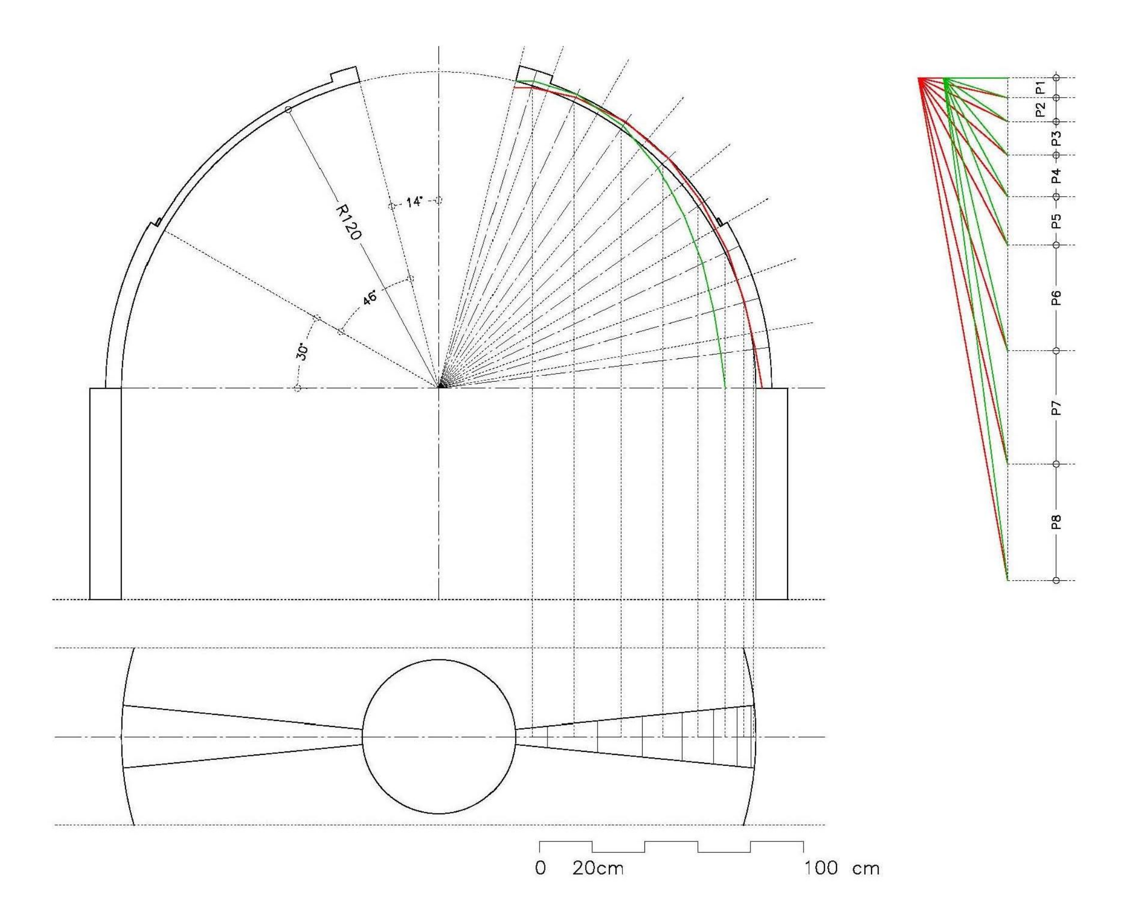


Figura 42. Análisis de equilibrio, siguiendo el método de los cortes, para comprobar la estabilidad de la cúpula tabicada.

La explicación para la estabilidad de la cúpula está en la teoría de la membrana, explicada en las clases de teoría: además del trabajo según los arcos-gajos que se estudia en el análisis de equilibrio de la figura 42, la cúpula trabaja en la dirección de los meridianos. La zona inferior de la cúpula es más gruesa (dos hojas) que la superior (una hoja), ya que en esa zona es donde se requieren tracciones siguiendo los meridianos, que la fábrica no podrá asumir.

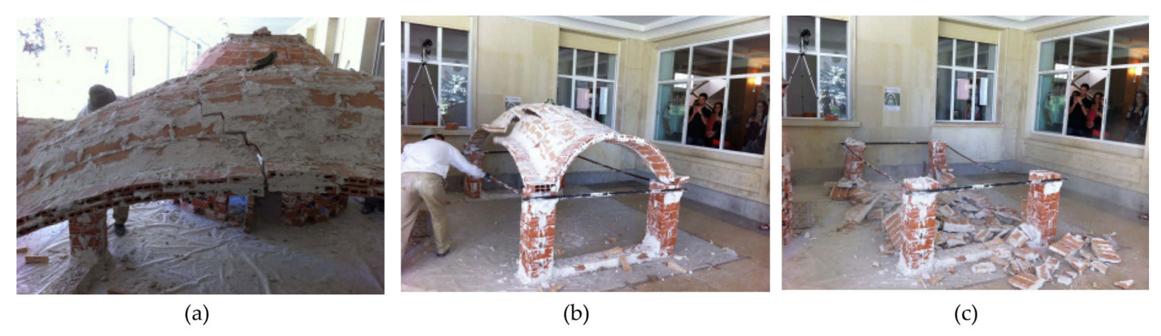
Rotura de las bóvedas

Para finalizar el taller, el lunes 2 de junio se lleva a cabo la rotura de las bóvedas que quedan en pie: escaleras, bóveda de cuatro puntos, cúpula. Otros arcos ya han sido ensayados.

Bóveda de cuatro puntos

La bóveda de cuatro puntos, en la que se habían colocado unas cuñas bajo los cuatro arranques y unos tirantes metálicos atornillados, fue la primera en ser rota. Se aflojaron los tirantes y se eliminaron las cuñas de los dos apoyos delanteros, de manera que se abrieron las primeras grietas. Con los tirantes aflojados, se movió la bóveda hasta que colapsó.

En el blog del taller (bovedastabicadas.wordpress.com) se puede ver un interesante video de la rotura de la bóveda.



(a) (b) (c)

Figura 43. Proceso de rotura de la bóveda de cuatro puntos. (a): Grietas abiertas en los laterales después de aflojar los tirantes y quitar las dos cuñas de los apoyos delanteros. (b): Movimiento lateral de la bóveda. (c): Bóveda colapsada.

Cúpula

La cúpula semiesférica fue cargada desde el óculo mediante una plataforma de andamio colgada. La carga consistió en el reaprovechamiento de los escombros de la bóveda anterior. Se fueron abriendo unas grietas meridianas hasta que la cúpula colapsó.

En el blog del taller (bovedastabicadas.wordpress.com) se puede ver un video de la rotura de la bóveda, en el que se observa perfectamente el mecanismo de colapso mediante el cual la cúpula se abre y vuelve a recuperar la geometría. El resto es ensañamiento hasta la total destrucción.



(a) (b) (c)

Figura 44. Proceso de rotura de la cúpula. (a): Plataforma de andamio preparada para colocar la carga; se ha colgado de dos piezas de madera cruzadas que apoyan en el borde del óculo. (b): Cargado de la cúpula con bloques de ladrillo procedentes de la bóveda de cuatro puntos ya derrumbada. (c): Cúpula colapsada.

5. TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

Uno de los objetivos del taller de Historia de la Construcción es la iniciación del estudiante en la labor investigadora. Con tal fin se han propuesto cuatro trabajos de investigación desarrollados en grupos. Con la elaboración de este trabajo se persigue introducir al alumno en el conocimiento de la metodología de documentación e investigación científica, así como en la elaboración de documentos académicos y las presentaciones orales de dicha investigación.
Se ha propuesto un formato de entrega igual para todos los trabajos con el objeto de preparar al alumno en el acato de unas directrices editoriales: formato de página, tamaño y formato de fuente, formato de citas y referencias, consideraciones en cuanto a la extensión máxima y mínima, número de figuras...
Los cuatro bloques temáticos son: 1. La construcción tabicada hasta el siglo XVIII; 2. Cataluña: la arquitectura industrial y el Modernismo; 3. Rafael Guastavino; y 4. La bóveda tabicada en la arquitectura moderna. Cada grupo, con el apoyo de los profesores, ha acotado el tema asignado según sus preferencias y tras haber realizado un primer acercamiento a la búsqueda documental. Una vez estudiada esta primera valoración, los trabajos realizados han sido los que se detallan a continuación.

Grupo 1. Origen de las bóvedas tabicadas

ESTUDIANTES. Ana González Lara, María González Mariñas, Adrián Mateos Rodríguez, Alejandro Gallardo Moreno, Giulia Filippone y María Lucía Cermeño.

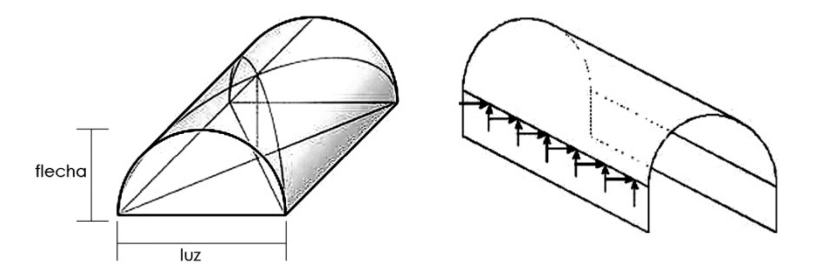


Figura 45. Esquema de una bóveda y sus empujes (grupo 1)

RESUMEN. La bóveda tabicada es un asunto de complejo estudio y análisis en lo que a sus orígenes se refiere. Es complicado saber cuándo se comenzó exactamente a utilizar esta técnica. El objetivo de esta investigación es ahondar en los orígenes de la bóveda tabicada en España y estudiar cuál ha podido ser su proceso evolutivo desde las primitivas técnicas de construcción de bóvedas de fábrica de ladrillo que tuvieron su origen en Mesopotamia. La investigación se lleva a cabo a través de diferentes personalidades históricas que han dejado su impronta a esta técnica constructiva, mediante el análisis del funcionamiento estructural y profundizando en el estudio y funcionamiento de determinadas obras arquitectónicas que han contribuido al desarrollo y difusión de esta técnica.

Grupo 2. El ladrillo y el modernismo

ESTUDIANTES. Íñigo Lope de Toledo, Joaquín Escribano, Jonathan Lien, Victor Ingmo, Íñigo Clemente, Elisa Gonzálvez

RESUMEN. El trabajo tiene como objetivo aprender a interpretar la construcción en ladrillo a lo largo d ela historia para desarrollar una propuesta de construcción con ladrillos sin cimbra. El trabajo consta de dos partes, de lo general a lo particular. Una primera parte de fundamentos sobre el ladrillo con reflexiones sobre tres principios: el volumen, el plano, la línea, el arco diafragma, la bóveda tabicada y el arco funicular. La segunda parte versa sobre la práctica a lo largo del tiempo, comenzando la reflexión sobre sobre las formas de la construcción con ladrillo y sus propiedades y haciendo énfasis en el período de construcción de la bóveda tabicada durante el modernismo en Cataluña en referencia a la obra de Antonio Gaudí y Josep Puig i Cadafalch.



Figura 46. Detalle de las bóvedas de la escalera de la Casa Moncaya (1898-1901) de Puig i Cadafalch

Grupo 3. Rafael Guastavino, gran difusor de la bóveda tabicada en el siglo XIX

ESTUDIANTES. Cristina Aguirre González, José María Arribas López, Catalina Barbero Ozaita, Noemí García Melgar y Sergio López Martín.

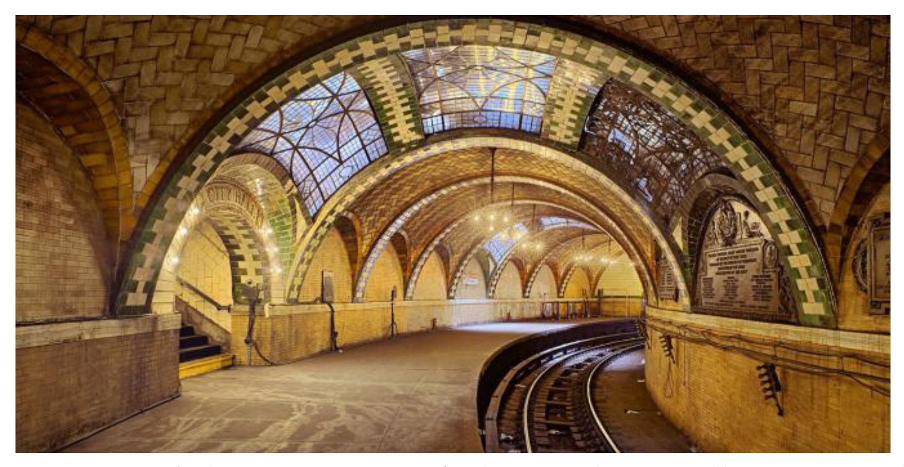


Figura 47. Rafael Guastavino, estación de metro de City Hall en Nueva York

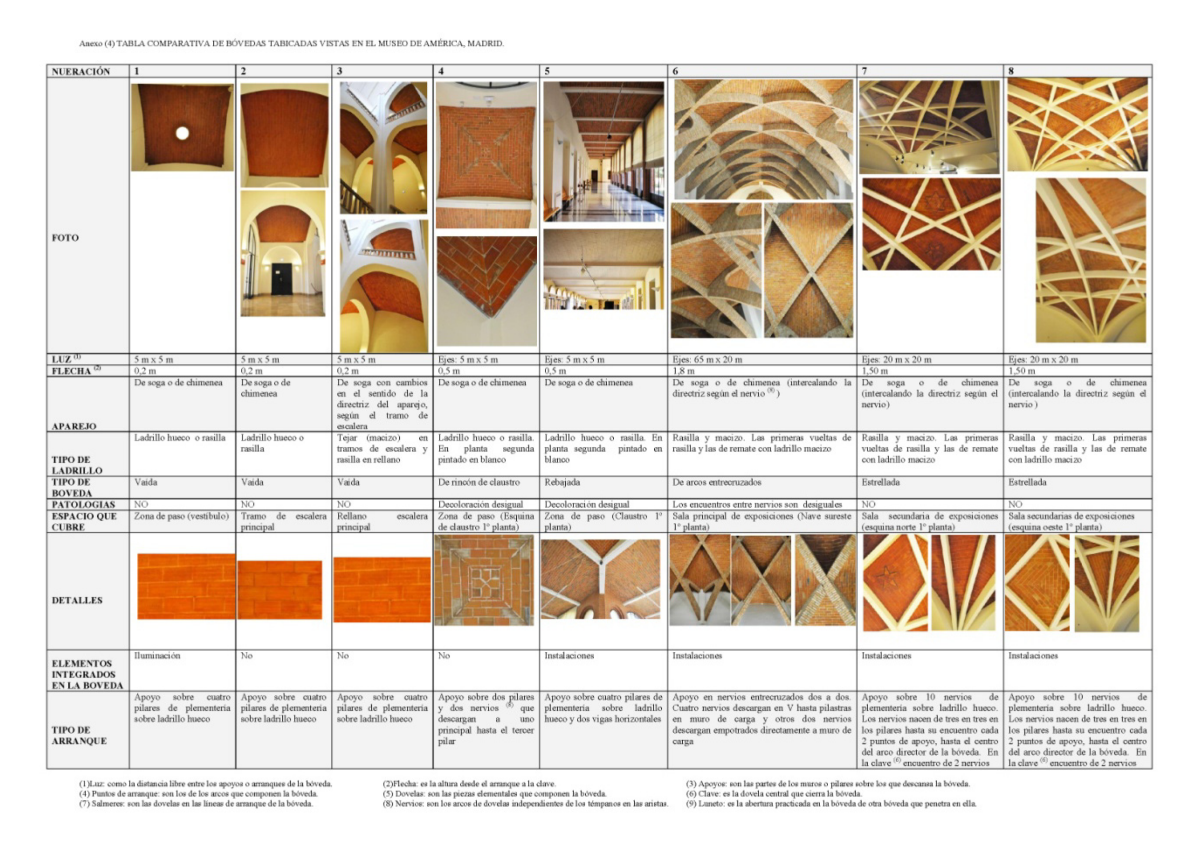
RESUMEN. El trabajo aborda la semblanza de los Guastavino y su aportación a la construcción americana con la transferencia de la bóveda tabicada. Se estudia en primer lugar la tradición

constructiva española del siglo XIX. El cuerpo central del estudio analiza la construcción de Rafael Guastavino atendiendo a su teoría de la construcción cohesiva, las patentes que registró para mejorar y desarrollar su sistema y se ilustra con la descripción de una selección escogida de ejemplos construidos.

Grupo 4. Luis Moya Blanco. Bóvedas tabicadas en la arquitectura moderna

ESTUDIANTES. Aina Buñola Pedrol, Patricia Domínguez Pérez, Cristina Hidalgo Romero, Patricia Juez Martínez yCoral Moore de la Torre.

RESUMEN. Después de la Guerra Civil, y ante la mala situación económica del país, la construcción tabicada resurgió como una posibilidad de aprovechar las técnicas tradicionales que suponían una mano de obra barata. Luis Moya mostró interés en este aspecto a través de la obra de Guastavino en Nueva York de principios de siglo. La arquitectura de Luis Moya destacó por aplicar soluciones de bóvedas tabicadas de luz media que reforzaba empleando arcos tabicados internos vistos, como se ve en la Iglesia de San Agustín y el Museo de América, o bien acostillando las bóvedas por trasdós. Luis Moya, además, volcó su labor profesional en la creación y experimentación de este tipo de construcción aplicada a espacios religiosos; jugando con la espacialidad y plasticidad que las bóvedas realizadas con ladrillo permitían. Las conclusiones y explicaciones a su obra quedaron reflejadas por el propio arquitecto en su libro *Bóvedas tabicadas*.



Anexo (4) TABLA COMPARATIVA DE BÓVEDAS TABICADAS VISTAS EN EL MUSEO DE AMÉRICA, MADRID.

NUERACIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8
FOTO								
LUZ (1)	5 m x 5 m	5 m x 5 m	5 m x 5 m	Ejes: 5 m x 5 m	Ejes: 5 m x 5 m	Ejes: 65 m x 20 m	Ejes: 20 m x 20 m	Ejes: 20 m x 20 m
FLECHA (2)	0,2 m	0,2 m	0,2 m	0,5 m	0,5 m	1,8 m	1,50 m	1,50 m
APAREJO	De soga o de chimenea	De soga o de chimenea	De soga con cambios en el sentido de la directriz del aparejo, según el tramo de escalera	De soga o de chimenea	De soga o de chimenea	De soga o de chimenea (intercalando la directriz según el nervio (8))	De soga o de chimenea (intercalando la directriz según el nervio)	De soga o de chimenea (intercalando la directriz según el nervio)
TIPO DE LADRILLO	Ladrillo hueco o rasilla	Ladrillo hueco o rasilla	Tejar (macizo) en tramos de escalera y rasilla en rellano	Ladrillo hueco o rasilla. En planta segunda pintado en blanco	Ladrillo hueco o rasilla. En planta segunda pintado en blanco	Rasilla y macizo. Las primeras vueltas de rasilla y las de remate con ladrillo macizo	Rasilla y macizo. Las primeras vueltas de rasilla y las de remate con ladrillo macizo	Rasilla y macizo. Las primeras vueltas de rasilla y las de remate con ladrillo macizo
TIPO DE BOVEDA	Vaída	Vaída	Vaída	De rincón de claustro	Rebajada	De arcos entrecruzados	Estrellada	Estrellada
PATOLOGIAS	NO	NO	NO	Decoloración desigual	Decoloración desigual	Los encuentros entre nervios son desiguales	NO	NO
ESPACIO QUE CUBRE	Zona de paso (vestíbulo)	Tramo de escalera principal	Rellano escalera principal	Zona de paso (Esquina de claustro 1° planta)	Zona de paso (Claustro 1° planta)	Sala principal de exposiciones (Nave sureste 1° planta)	Sala secundaria de exposiciones (esquina norte 1° planta)	Sala secundarias de exposiciones (esquina oeste 1° planta)
DETALLES								
ELEMENTOS INTEGRADOS EN LA BOVEDA	Iluminación	No	No	No	Instalaciones	Instalaciones	Instalaciones	Instalaciones
TIPO DE ARRANQUE	Apoyo sobre cuatro pilares de plementería sobre ladrillo hueco	Apoyo sobre cuatro pilares de plementería sobre ladrillo hueco	Apoyo sobre cuatro pilares de plementería sobre ladrillo hueco	Apoyo sobre dos pilares y dos nervios (8) que descargan a uno principal hasta el tercer pilar	Apoyo sobre cuatro pilares de plementería sobre ladrillo hueco y dos vigas horizontales	Apoyo en nervios entrecruzados dos a dos. Cuatro nervios descargan en V hasta pilastras en muro de carga y otros dos nervios descargan empotrados directamente a muro de carga	Apoyo sobre 10 nervios de plementería sobre ladrillo hueco. Los nervios nacen de tres en tres en los pilares hasta su encuentro cada 2 puntos de apoyo, hasta el centro del arco director de la bóveda. En la clave (6) encuentro de 2 nervios	Apoyo sobre 10 nervios de plementería sobre ladrillo hueco. Los nervios nacen de tres en tres en los pilares hasta su encuentro cada 2 puntos de apoyo, hasta el centro del arco director de la bóveda. En la clave (6) encuentro de 2 nervios

(1)Luz: como la distancia libre entre los apoyos o arranques de la bóveda. (2)Flecha: es la altura desde el arranque a la clave. (3) Apoyos: son las partes de los muros o pilares sobre los que descansa la bóveda.
(4) Puntos de arranque: son los de los arcos que componen la bóveda. (5) Dovelas: son las piezas elementales que componen la bóveda. (6) Clave: es la dovela central que cierra la bóveda.
(7) Salmeres: son las dovelas en las líneas de arranque de la bóveda. (8) Nervios: son los arcos de dovelas independientes de los témpanos en las aristas. (9) Luneto: es la abertura practicada en la bóveda de otra bóveda que penetra en ella.

Figura 48. Análisis comparativo y clasificación de las bóvedas del Museo de América de Luis Moya (grupo 4)

6. PROYECTOS DE BÓVEDAS TABICADAS

Uno de los trabajos del curso fue el proyecto de una bóveda tabicada. Aprovechando el concurso de Hispalyt para proyectar un pabellón de acceso a la cripta Güell, lo planteamos la siguiente manera. El trabajo se realizó por grupos, y esto fue lo que se presentó, contado por ellos mismos.

TALLER DE HISTORIA DE LA CONSTRUCCIÓN. BÓVEDAS TABICADAS

Profesores: Santiago Huerta; Carlos Martín; Paula Fuentes; Ignacio J. Gil; Esther Redondo.

TRABAJO DE GRUPO: DISEÑO DE UNA BÓVEDA TABICADA COMO PABELLÓN DE ACCESO A LA CRIPTA GÜELL

En la última parte del taller (desde Semana Santa hasta el final de curso) vamos a construir conjuntamente una bóveda diseñada por los alumnos. El trabajo se hará por grupos.

Las premisas para diseñar la bóveda son las siguientes:

1. El "programa" arquitectónico es el propuesto en el IX CONCURSO DEL AULA CERÁMICA HISPALYT (más información en www.aulahispalyt.es), que plantea la construccion de un pabellón de acceso a la Cripta de la Colonia Güell. Es un edificio de unos 40 m², cuyo uso será punto de información y venta de entradas al edificio; cerrado y cubierto, y empleando el ladrillo como material principal, aunque no el único.



2. Por limitaciones de tiempo y espacio, en el taller construiremos el edificio a escala reducida, con un máximo de 20 m² en planta y un máximo de 2 m de altura, que es aproximadamente la mitad de superficie y de altura máxima que tendría el pabellón del concurso. Además, construiremos sólo la parte del proyecto que se resuelva con una bóveda tabicada de ladrillo.



3. El sitio físico en el que se va construir la bóveda es el techo del gimnasio, al lado de la pista de rugby. Por lo que las dimensiones en planta no deben superar a las de este espacio. Además, el pabellón solo puede apoyarse en las vigas del forjado, situadas aproximadamente cada 2,5 m (comprobad medidas en planta y entre vigas en una visita al lugar)

El contenido del trabajo será:

-Los planos necesarios para definir el pabellón: plantas, secciones, alzados, en el número y calidad que considereis suficientes para permitir su construcción, especialmente la parte que se lleve a cabo con una bóveda tabicada de ladrillo

-Los planos necesarios para definir las formas (cimbras ligeras) necesarias para la construcción de la bóveda. Estas formas utilizarán materiales básicos de maquetas, principalmente carton marrón, aunque también pueden emplearse cables o madera de balsa de manera puntual.

-Una memoria de calculo en la que se justifique de la estabilidad de la bóveda una vez terminada.

-Un presupuesto de la obra, incluyendo rasillas (10x20x2,5 cm; 0,12 euros/ud), yeso (1,60 euros/saco 20 kg), ladrillo hueco doble (12x24x7 cm; 0,16 euros/ud) y los materiales empleados para las formas.
(en construir 1m² de bóveda se emplea aproximadamente 1 saco de 20 kg de yeso)

-un esquema del proceso constructivo de la bóveda, por fases: ¿por qué sitio o sitios se empieza la construcción? ¿cómo se colocan y se estabilizan las formas? ¿se colocan cimbras bajo toda la bóveda o son desplazables?, etc.

El trabajo se entregará así:
-el miércoles 23 de abril (el primer día de clase después de Semana Santa) debéis traer el trabajo impreso y preparar una presentación. Ese día haremos una exposición pública de los trabajos, en el aula 1G3. Un jurado compuesto por Carlos Martín, Santiago Huerta y un profesor invitado elegirá el mejor de los cuatro grupos. La bóveda ganadora será la que se construya. En la elección se tendrá en cuenta tanto la calidad de la propuesta como su viabilidad constructiva.

Todos los profesores del taller estamos disponibles los miércoles y los jueves para responder a las dudas que tengais sobre el desarrollo del trabajo, que podéis empezar ya.

Figura 49. Enunciado del trabajo de proyecto de una bóveda tabicada

Proyecto grupo 1

En el proyecto se plantea un conjunto de tres bóvedas continuas de 2,10 m de luz cada una. De planta cuadrada, están constituidas por un sistema de arcos ojivales. Aunque no es la ojiva mecánicamente considerada la forma racional de bóveda para los casos ordinarios de pesadas sobrecargas móviles, con esta forma se reduce los cimientos de sus pilas. Estéticamente queda más enfatizada la entrada a estas pequeñas bóvedas.

El material que se emplea para la construcción de la misma, es el mismo que hemos venido empleando a lo largo del taller: rasillas de ladrillo de 10x20x2,5 cm y mortero de yeso. Será necesario para la construcción el empleo de cimbras, que podrían hacerse fácilmente con cartón.

Para la estabilidad de las bóvedas será necesario emplear una doble capa de ladrillo, de esta manera la línea de empujes queda en el interior del arco planteado.

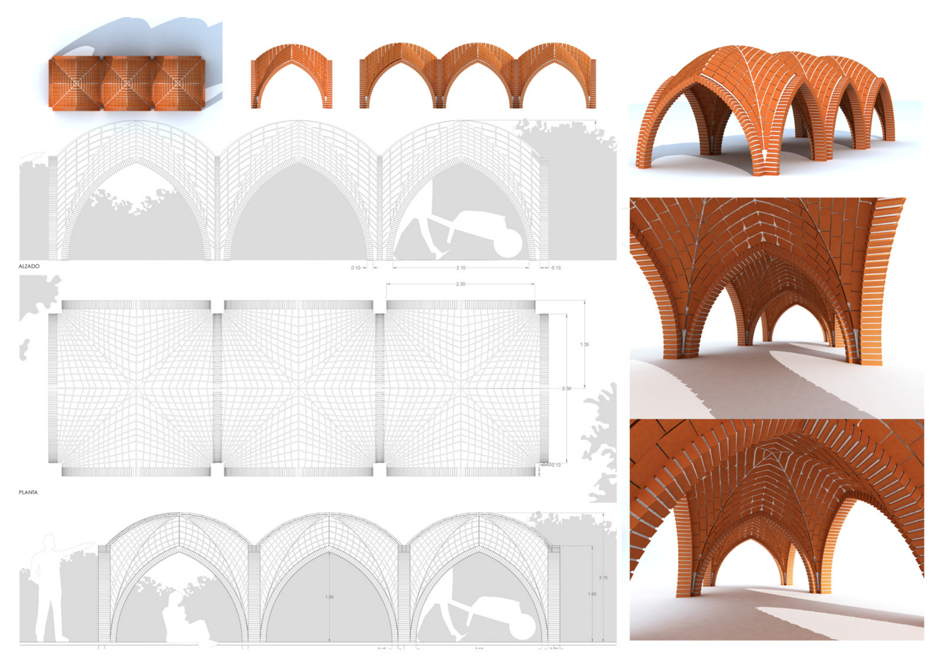


Figura 50. Alzado y planta del proyecto del grupo 1

Proyecto grupo 2

El proyecto GettoBlaster tiene como intención dar respuesta a una demanda antropológica y arrancar un proceso de investigación abierto a propuestas para su construcción. Nos situamos en el extremo de la cubierta de los gimnasios de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid que es a su vez un llano en alto de alrededor de 6 metros de ancho por 85 metros de largo que a su vez es el final del Jardín de la Rosaleda un límite y un cambio de rasante de dos espacios diferentes, el jardín y los campos de fútbol. El lugar se caracteriza por ser espacio de confluencia entre alumnos que acceden a la facultad por el parking con alumnos que están haciendo deporte y los que están de recreo. En éste punto de confluencia en invierno es difícil estar por la lluvia y el viento y en verano principalmente por el sol por falta de sombra.

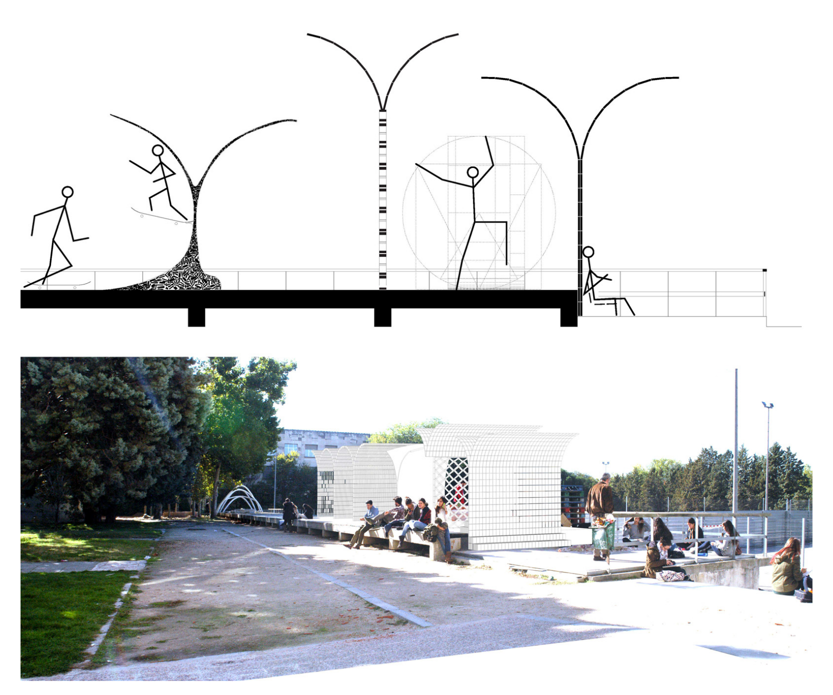


Figura 51. Imágenes del proyecto del grupo 2

Proyecto grupo 3

El proyecto se basa en 4 paraboloides hiperbólicos intersecados entre sí, cuyas intersecciones generan unas parábolas que se ven desde el interior. La idea inicial era plantear un primer paraboloide para el acceso directo de los visitantes y que éstos puedan visitar la arquitectura del lugar. Los otros tres están destinados a la venta de entradas y exposición de los actos que se pudieran realizar en el interior de la cripta. Se genera un ritmo de diferentes alturas en la fachada y se pretende hundir el terreno para dar una sensación similar a la de una cripta o una caverna. El proyecto se resolvería con dos roscas de rasillas y una capa impermeable y protectora en la superficie.

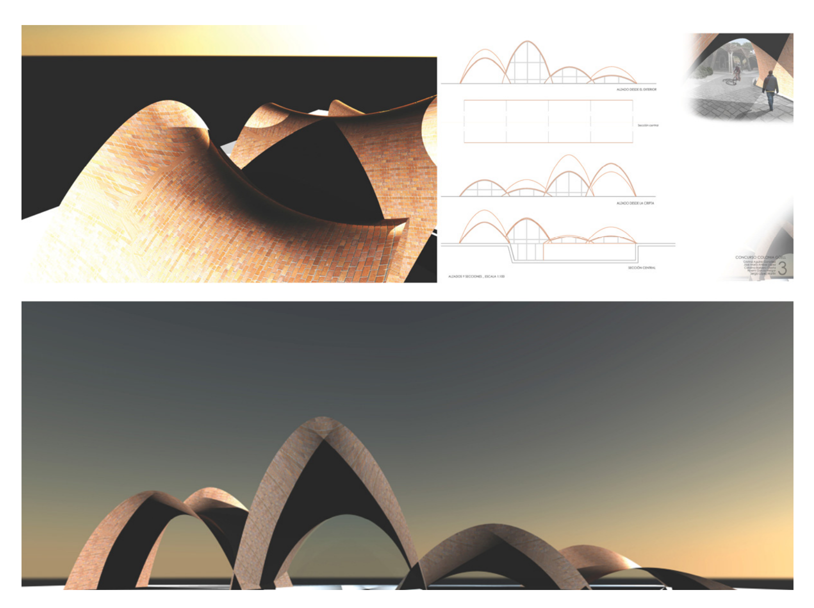


Figura 52. Imágenes del proyecto del grupo 3

Proyecto grupo 4

El proyecto fue pensado de forma que pudiese presentarse para el concurso emplazado en el Parque Güell, siguiendo las proporciones propuestas para clase (es decir, vigas cada 2,5 metros). En todo momento, supimos que queríamos hacer una bóveda sencilla, debido a que en la práctica en clase fuimos conscientes de la dificultad que supone la construcción de este tipo de bóvedas, para aquellos que no tienen experiencia previa. Además nos basamos en un concepto de pabellón, de espacio continuo, y dispuesto de tal forma que se pudiese estructurar los diferentes ámbitos propuestos, recepción, pase de visitantes, etc,…

Por lo que la propuesta consiste en dos troncos de cono rotados entre sí e intersecados de tal forma que creaban un paso interior, uno de los fines de nuestra propuesta.

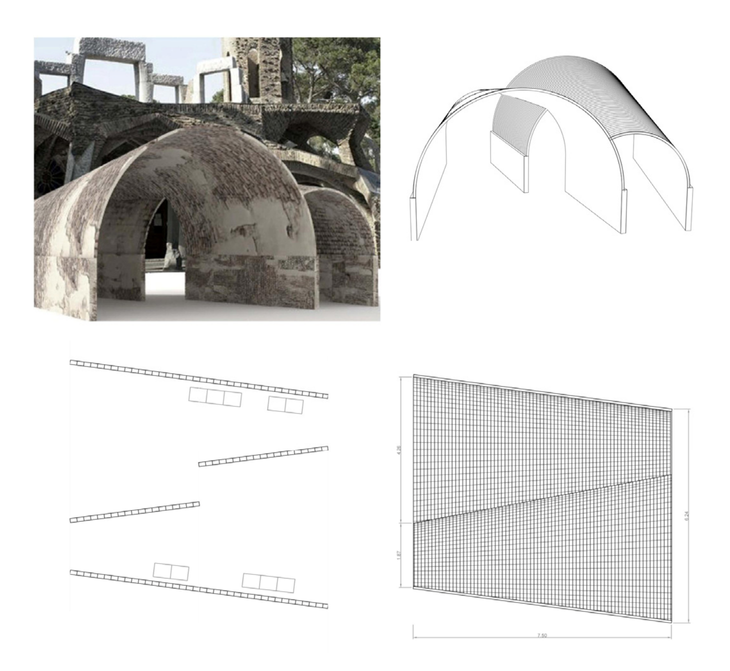


Figura 53. Imágenes y planos del proyecto del grupo 4

Proyectos ganadores

El jurado del concurso estaba compuesto por: Santiago Huerta. Profesor titular de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid y profesor responsable del taller; Carlos Martín. Constructor de bóvedas tabicadas. Profesor del taller; Joaquín Antuña. Profesor de estructuras de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Tras la exposición de los trabajos y teniendo en cuenta tanto el proyecto en sí, como sus posibilidades reales de construcción, eligieron el proyecto del grupo 4. Paralelamente los alumnos votaron de manera anónima y eligieron como proyecto ganador el del número 1.

Proyecto definitivo

A partir de la propuesta ganadora del concurso “Diseño de bóveda para pabellón de acceso a la Cripta Güell” diseñamos el proyecto de construcción del prototipo.

La propuesta de las compañeras del Grupo 4, el ganador, consistió en la intersección de dos bóvedas cónicas, una creciente y otra decreciente, de directriz semicircular, apoyadas en muros verticales. Al completar el trabajo con un estudio de estabilidad de las bóvedas, vimos que el perfil propuesto no era estable al no contener la línea de empujes de su peso propio. Las principales modificaciones en la propuesta vinieron de este problema.

Comenzamos, con ayuda de las integrantes del Grupo 4, sustituyendo el perfil semicircular sobre muro vertical por un perfil parabólico. Pero este perfil, aunque más adecuado, tampoco resultaba correcto.



Figura 54. Secciones y alzados parabólicos de la modificación del proyecto de la bóveda

Finalmente, diseñamos la bóveda con ayuda de unas cadenas que representaban la forma exacta (pero invertida) de la línea de empujes del eso propio. Dando esa forma a la bóveda, es seguro que será estable incluso con un espesor muy pequeño. La operación de colgar la cadena la hicimos para tres secciones representativas de la bóveda: en el extremo, donde una de las bóvedas es muy grande y otra muy pequeña, en el centro, donde las dos son iguales, y en una posición intermedia entre las dos anteriores.

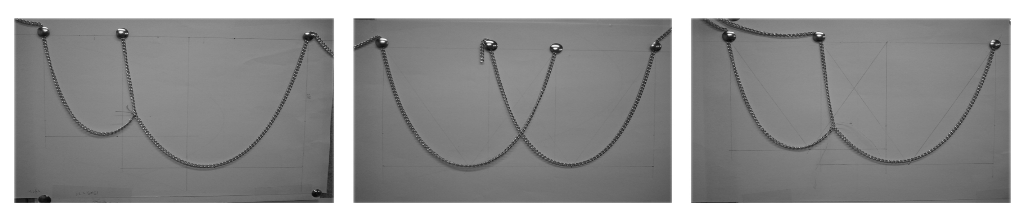


Figura 55. Cadenas utilizadas para dar la forma catenaria a la bóveda, fijando la luz, la altura, y el punto de intersección de los dos conos

Con estos tres perfiles, cortamos unas formas de cartón pluma que nos sirvieron para construir una maqueta de hilos. Esta maqueta representa aproximadamente la forma que tendrá la bóveda construida.

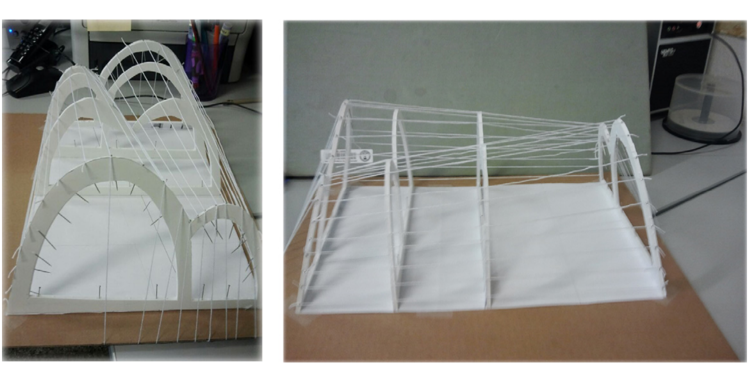


Figura 56. Maqueta construida para ver la forma de la bóveda

Construcción de la bóveda ganadora del concurso

Aunque finalmente no se pudo terminar la bóveda, el proceso seguido fue el siguiente:

En primer lugar se construyeron las cimbras, tres secciones como las de la maqueta. La forma de la catenaria se obtuvo por coordenadas a partir de las cadenas pequeñas (figura 57).

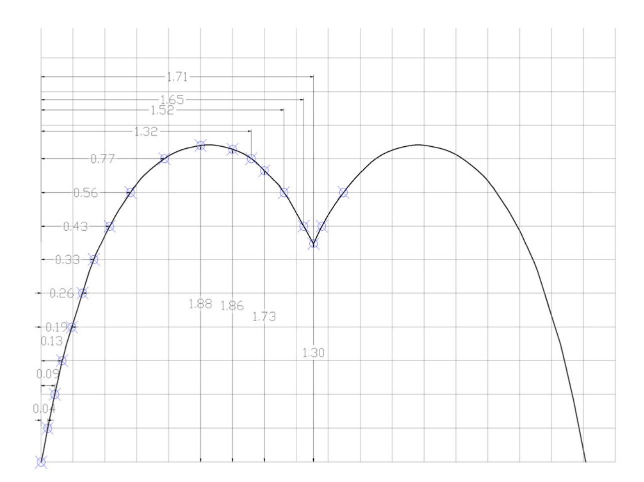


Figura 57. Puntos con sus coordenadas para pasarlos a las cimbras de cartón

Para que las cimbras fueran más estables, se hicieron dobles con trozos de porexpán entre los dos cartones. Así el grosor total es el de una rasilla, y se pueden colocar con más facilidad.





Figura 58. Construcción de las cimbras de cartón

Una vez construidas las cimbras, el siguiente paso es hacer el replanteo, marcando la posición de las cimbras con tiza en el suelo (figura 59).

Tras colocar las cimbras se colocaron los hilos que dan la forma de la superficie de la bóveda y se empezó a construir los arcos sobre las cimbras (figura 60). Una vez endurecido el yeso se puede proceder a quitar las cimbras (figura 61).




Figura 59. Replanteo y colocación de las cimbras




Figura 60. Construcción del primer arco sobre las cimbras




Figura 61. Arcos completos. A la izquierda descimbrado del arco pequeño

Lamentablemente los arcos se cayeron al día siguiente de haberlos construidos, probablemente porque son muy inestables en el plano transversal. El proceso constructivo elegido no fue el apropiado, y seguramente teníamos que haber construido parte de la bóveda en el otro sentido para evitar este colapso.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA SOBRE BÓVEDAS TABICADAS

Araguas, P. 1998. «L´Acte de naissance de la "boveda tabicada", ou, le certificat de naturalisation de la "voûte catalane"». *Société Française d´Archéologie*: 129-136.

Bannister, T.C. 1968. «The Roussillon vault. The apotheosis of a 'Folk' construction». *Journal of the Society of Architectural Historians,* 27: 163-175.

Bassegoda Musté, B. 1952. *Bóvedas tabicadas*. Madrid: C.S.I.C.

Blondel, J.F y Patte, P. 1771-1777. *Cours d'Architectue.* Paris: Chez la Veuve Desaint.

Bosch Reitg, I. 1949. «La bóveda vaída tabicada». *Revista Nacional de Arquitectura,* 185-99.

Collins, G. R. 1968. «The transfer of thin masonry vaulting from Spain to America». *Journal of the Society of Architectural Historians* 27: 176-201.

Dunn, W. 1908. «The Principles of Dome Construction». *Architectural Review,* 23: 63-73; 108-112.

D'Espie, F.-F. Comte. 1754. *Maniere de rendré toutes sortes d'edifices incombustibles.* Paris: Duchesne.

Fornés y Gurrea, M. 1841. *Observaciones sobre la práctica del arte de edificar*. Valencia: Cabrerizo. (Facs. ed. Valencia: Librería Paris-Valencia, 1993.)

Gómez Ferrer, M. 2003. «Bóvedas tabicadas en Valencia en los siglos XIV a XVI». En: *Una arquitectura gótica mediterranea*. eds. Mira, E. Y Zaragozá, A. vol. 2: 135-156

Guastavino, R. 1893. *Essay on the Theory and History of Cohesive Construction, applied especially to the timbrel vault.* Boston: Ticknor and Company.

Guastavino, R. 2006 . *Escritos sobre la construcción cohesiva. S.* Huerta (ed). Madrid: Instituto Juan de Herrera.

Heyman, J. 1977. *Equilibrium of shell structures. Oxford.* Oxford University Press.

—. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos.* S. Huerta (ed.). Madrid: Instituto Juan de Herrera.

—. 1999. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

—. 2012.«Cáscaras delgadas de fábrica». *Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas* (Valencia, 26-28 de mayo, 2011). R. Soler, A. Zaragozá y R. Marín, eds. Valencia: UPV, 294-306.

Huerta, S. 2001(ed.). *Las bóvedas de Guastavino en América*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU

Huerta, S. 2003. «The mechanics of timbrel vaults: a historical outline». *Essays in the History of Mechanics.* A. Becchi, M. Corradi, F. Foce y O. Pedemonte Eds. Basel: Birkhäuser: pp. 89-133.

—. 2004. Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

—. 2005. «The use of simple models in the teaching of the essentials of masonry arch behaviour». En: *Theory and practice of constructions: knowledge, means and models. Didactics and research experiences* (Ravenna 27-29 ottobre 2005), editado por G. Mocchi. Ravenna: DAPT Università di Bologna, Fondazione Flaminia, Vol. 2, pp. 747-761.

Marías, F. 1991. «Piedra y ladrillo en la arquitectura española del siglo XVI». En: *Les chantiers de la Renaissance.* J. Guillaume (ed.). París: Picard, 71-83.

Martorell, J. 1910. «Estructuras de ladrillo y hierro atirantado en la arquitectura catalana moderna». *Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña,* 119-146

Moya Blanco, L. 1947. *Bóvedas Tabicadas.* Madrid: Ministerio de la Gobernación. Dirección General de Arquitectura

Ochsendorf, J. 2010. *Guastavino vaulting. The art of structural tile.* New York: Princenton Architectural Press.

San Nicolás, Fray Lorenzo de. 1639. *Arte y uso de arquitectura. Primera parte.* Madrid: s.i. (Fasc. Madrid: Albatros Ediciones, 1989).

Sotomayor, J. de. 1776. *Modo de hacer incombustibles los edificios sin aumentar el coste de la construcción. Extractado del que escribió en francés el Conde de Espié.* Madrid: Oficina de Pantaleón Aznar.

Tarragó, S. (ed.) 1998. *Apuntes del curso "Las grandes bóvedas hispanas".* Madrid: Ministerio de Fomento-CEHOPU-CEDEX.

Terradas, E. *La llibreta de la volta*. Manuscrito inédito (ca. 1920). Barcelona.

Truñó Rusiñol, Á. 2004. *Construcción de bóvedas tabi-cadas*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

Zaragozá, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. *Construyendo Bóvedas Tabicadas. Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas. Valencia, 26-28 mayo 2011.* Zaragozá, A., Soler R., Marín R. (eds). 2012. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

NOTAS

CUADERNO



Cuadernos.ijh@gmail.com
info@mairea-libros.com

